



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Mejora de la eficiencia en la compensación de agujas náuticas

Jorge Moncunill Marimón

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona



TESIS DOCTORAL

*DOCTORADO EN INGENIERÍA NÁUTICA, MARINA Y
RADIOELECTRÓNICA NAVAL*

Título

**MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA
COMPENSACIÓN DE AGUJAS NÁUTICAS**

Doctorando

Jorge Moncunill Marimón

Directores

Agustí Martín Mallofré

Aitor Martínez-Lozares

Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas

Barcelona, Septiembre de 2021

Mejora de la eficiencia en la compensación de agujas náuticas

Los que descienden al mar en naves,
Y hacen negocio en las muchas aguas,
Ellos han visto las obras de Jehová,
Y sus maravillas en las profundidades.
Porque habló, e hizo levantar un viento tempestuoso,
Que encrespa sus ondas.
Suben a los cielos, descienden a los abismos;
Sus almas se derriten con el mal.
Tiemblan y titubean como ebrios,
Y toda su ciencia es inútil.
Entonces claman a Jehová en su angustia,
Y los libra de sus aflicciones.
Cambia la tempestad en sosiego,
Y se apaciguan sus ondas.
Luego se alegran, porque se apaciguaron;
Y así los guía al puerto que deseaban.
Alaben la misericordia de Jehová,
Y sus maravillas para con los hijos de los hombres.

Salmo 107:23-31

Resumen, objetivo, motivación, índice, listas, bibliografía y metodología

Resumen.....	v
Abstract	vi
Agradecimientos.....	vii
Objetivo.....	ix
Motivación	ix
Índice.....	xi
Lista de símbolos y abreviaturas	xv
Lista de Figuras	xxviii
Lista de Tablas	xxxiv
Bibliografía.....	xxxvii
Metodología	xliv

don benito Pérez carrasco Que fue alcalde electo de bilbao

Regla mnemotécnica:

el coeficiente A depende de las varillas d, b (don benito);

el B, del imán P y la varilla c (Pérez carrasco);

el C, del imán Q y la varilla f (Que fue);

el D, de las varillas a, e (alcalde electo),

y el E, de las varillas d, b (de bilbao).

Resumen

El objetivo de esta tesis es mejorar la eficiencia en la compensación de agujas náuticas.

En primer lugar, se realiza un estudio completo, ordenado, sintético y actualizado de esta materia, incluyendo el estado de la técnica, así como la normativa internacional y nacional, y a continuación, se plantean cuatro casos de estudio enfocados a:

i) La obtención de un método que permite aprovechar la información de rumbo efectivo dada por el GPS, a fin de confeccionar la tablilla de los desvíos residuales en embarcaciones menores, cuyo único indicador de rumbo es el compás magnético, una vez se han compensado los desvíos a dos enfilaciones próximas a rumbos magnéticos cardinales separados 90°.

ii) Un estudio sobre la incidencia de las varillas asimétricas d , b (causantes de los coeficientes A , E), a fin de simplificar la metodología para compensar. Aparte, también se propone una mejora en la exactitud del cálculo de los desvíos residuales cuando se compensa siguiendo enfilaciones que no coinciden exactamente con rumbos magnéticos cardinales o cuadrantales.

iii) El estudio de la problemática en la selección del rumbo cuadrantal para confeccionar la tablilla de los desvíos residuales mediante la fórmula práctica de la ecuación del desvío, ya que la experiencia muestra que, de los cuatro desvíos a los rumbos cuadrantales, siempre hay uno que se desajusta; esto es: que da un coeficiente D diferente del que se obtiene con cualquiera de los otros tres.

iv) La obtención de un método para compensar y levantar la tablilla de los desvíos residuales con un solo borneo a cuatro rumbos magnéticos. Esto supone un ahorro de tiempo y combustible, así como un aumento de la seguridad de los buques, al estar menos tiempo borneando cerca de tierra y de otros buques.

Formalmente, la tesis se estructura en cuatro partes. La primera de ellas es introductoria, y trata sobre magnetismo, agujas magnéticas y sistemas de unidades electromagnéticas. La segunda parte corresponde a un estudio actualizado sobre los fundamentos de la compensación de agujas náuticas. En la tercera parte, se describe el estado de la técnica en lo referente a la investigación sobre compases magnéticos y su compensación. Y en la cuarta parte, se desarrollan los casos de estudio citados. Finalmente, se extraen las conclusiones. Además, se incorpora un anexo con la normativa internacional y nacional sobre compases magnéticos y su compensación.

Abstract

The objective of this thesis is to improve the efficiency in the compass adjustment.

First, a complete, orderly, synthetic and updated study on this matter is performed, including the state of the art, as well as the international and Spanish regulations, and then, four cases of study are considered to be focused on:

i) Obtaining a method that allows to use the information of course over ground given by the GPS, in order to create the table of the residual deviations (deviation table) in small crafts, where the unique course indicator is the magnetic compass, once the deviations have been compensated to two leading lines close to cardinal magnetic courses separated by 90° .

ii) A study on the incidence of asymmetric rods d , b (which cause coefficients A , E), in order to simplify the methodology to compensate. Besides, an improvement in the accuracy of the calculation of the residual deviations is also proposed when it is compensated by following lines that do not exactly coincide with cardinal or quadrantal magnetic courses.

iii) A study of the problem in the selection of the quadrantal course for creating the deviation table by the practical formula of the equation of deviation, as experience demonstrates that, from the four deviations on the quadrantal courses, there is always one that is misaligned, i.e. that gives a coefficient D different from the obtained with any of the other three.

iv) Obtaining a method for adjusting and creating the deviation table with a single swing to four magnetic courses. This saves time and fuel, as well as increases the safety of ships by staying less time near the shore and other vessels.

Formally, the thesis is structured in four parts. The first one is introductory, and deals on magnetism, magnetic compasses, and systems of electromagnetic units. The second part corresponds to an updated study on the fundamentals of the compass adjustment. In the third part, the state of the art in regard to research on magnetic compasses and their adjustment is described. And in the fourth part, the aforementioned cases of study are developed. Finally, conclusions are drawn. In addition, an annex with the international and Spanish regulations on magnetic compasses and their adjustment is incorporated.

Agradecimientos

A mi esposa Carmen

A mis directores Agustí y Aitor

A mis padres Isidre y María Gloria

A mis abuelos Valentín y Ángela e Isidro y Gloria

A mi pastor Lorenzo y a mis hermanos de la Iglesia

A Juan Antonio Echevarría y a José Francisco González por haberme permitido hacer uso de sus embarcaciones

A los profesores de la Facultad de Náutica de Barcelona y especialmente a Agustí y a Xavi y a Marcel·la y a José Manuel por haberme orientado y apoyado en todo momento

A Montse Margalef por su atención

Al personal de Gestión Académica y de Conserjería de la Facultad de Náutica de Barcelona

A mis profesores de Marina Civil y del BUP y COU y de la EGB

A mis compañeros de los barcos y especialmente a Polo

A mis compañeros del Servei d'Ocupació de Catalunya y del SEPE

Objetivo

Los objetivos de esta tesis son:

- i) Realizar un estudio completo, ordenado, sintético y actualizado sobre la compensación de agujas náuticas.
- ii) Mejorar la eficiencia de dicha actividad, lo cual está enfocado a la obtención de métodos para compensar, que principalmente son: el uso adecuado de la información de rumbo efectivo que proporciona el GPS, a fin de confeccionar la tablilla de los desvíos residuales en embarcaciones que solo disponen de compás magnético para indicar el rumbo verdadero (*heading*), y la compensación (ajuste del compás y confección de la tablilla de los desvíos residuales) mediante un solo borneo de cuatro rumbos en buques equipados con compás gisoscópico y/o satelital.

Motivación

La motivación de esta tesis se encuentra en los dos siguientes puntos:

- i) Mi proyección personal en la docencia.
- ii) La mejora de la efectividad en las técnicas empleadas en la navegación. Concretamente, en la mejora de la eficiencia de la compensación de agujas náuticas, actividad relacionada con la seguridad de la navegación, de acuerdo con la regla V/19 del actual Convenio SOLAS y otra normativa.

El interés por la compensación se me despertó durante mi experiencia profesional en la mar, las veces que había que compensar la aguja para obtener la correspondiente certificación oficial. La relación personal con los compensadores de dos puertos que solíamos tocar, Puebla del Caramiñal y Port Louis (Mauricio), me llevó a buscar los apuntes de estudiante, así como otros libros, para adentrarme en el estudio de esta materia, el cual empecé como una afición durante los periodos de vacaciones, hace ya dieciséis años. También por interés personal, en 2010, realicé el curso oficial de compensador, y en 2015, tuve la oportunidad de colaborar con el Doctor Martínez-Lozares, de la Universidad del País Vasco, en la realización de unas compensaciones. Este profesor me animó a presentar la tesis doctoral sobre el tema de la compensación, de manera que vi como mi interés para mejorar la eficiencia de esta técnica se unía a la necesidad de realizar la tesis doctoral para mi proyección en la docencia.

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
PARTE I: MAGNETISMO: PRINCIPIOS, AGUJA NÁUTICA, UNIDADES Y MAGNETISMO TERRESTRE.....	3
I.1. Magnetismo y aguja náutica	5
I.1.1. Imanes.....	5
I.1.2. Campo magnético	6
I.1.3. Inducción	10
I.1.4. Clasificación de los hierros	11
I.1.5. Aguja náutica.....	12
I.1.6. Momento director	15
I.1.7. Periodo de oscilación.....	16
I.1.8. Sistema de agujas múltiples.....	17
I.2. Unidades electromagnéticas	19
I.2.1. Sistemas basados en las unidades macánicas y sistema CGS.....	19
I.2.2. Sistema Internacional de Unidades.....	22
I.2.3. Unidades magnéticas	25
I.3. Elementos del campo magnético terrestre	31
PARTE II: ESTUDIO SOBRE LA COMPENSACIÓN DE AGUJAS NÁUTICAS	37
II. 1. Campos magnéticos que afectan a la aguja.....	39
II.1.1. Introducción	39
II.1.2. Magnetismo terrestre.....	39
II.1.3. Magnetismo permanente del buque	40
II.1.4. Magnetismo inducido del buque	41
II.1.5. Efecto conjunto de los tres campos magnéticos.....	47
II.1.6. Fuerza directriz media y coeficiente λ	48
II.2. Coeficientes, ecuaciones y clasificación de los desvíos	49
II.2.1. Coeficientes exactos y ecuación exacta del desvío	49
II.2.2. Coeficientes aproximados y ecuaciones aproximadas del desvío.....	50
II.2.3. Clasificación de los desvíos	52
II.2.4. Clasificación de las fuerzas perturbadoras	55
II.2.5. Clasificación de las fuerzas directrices y determinación del coeficiente λ	58
II.3. Determinación de los coeficientes aproximados	61

II.4. Compensación preliminar	71
II.4.1. Introducción	71
II.4.2. Imanes longitudinales y transversales	71
II.4.3. Potencias absoluta y relativa	72
II.4.4. Métodos para compensar el desvío semicircular.....	75
II.4.5. Fuerza ejercida por un imán corrector.....	77
II.4.6. Estudio del coeficiente D	80
II.4.7. Correctores del coeficiente D: esferas.....	81
II.4.8. Métodos para compensar el coeficiente D	84
II.4.9. Compensación del coeficiente E: giro de las esferas	86
II.4.10. Casos prácticos de compensación preliminar	88
II.4.11. Coeficiente λ_2	95
II.4.12. Tablilla de desvíos residuales y Certificado de compensación de agujas náuticas	96
II.5. Compensación definitiva.....	97
II.5.1. Efecto del cambio de latitud magnética sobre los desvíos	97
II.5.2. Determinación de las dos partes de los coeficientes B, C dados dichos coeficientes en dos puntos de diferente latitud magnética	99
II.5.3. Corrector de la varilla c: barra Flinders	104
II.5.4. Compensación de la varilla f: giro de la barra Flinders	105
II.5.5. Compensación en el ecuador magnético	108
II.5.6. Rumbo de grada	110
II.6. Desvío de escora	115
II.6.1. Introducción	115
II.6.2. Imanes y varillas	115
II.6.3. Coeficientes y ecuaciones	118
II.6.4. Compensación del desvío de escora.....	121
II.6.5. Fuerza vertical media, coeficiente μ , factor del barco y balanza de inclinación ...	123
II.7. Efectos secundarios de los correctores	127
II.8. Limitaciones de la aguja náutica.....	129
II.8.1. Limitación de la compensación.....	129
II.8.2. Limitación en las zonas polares	129
PARTE III: ESTADO DE LA TÉCNICA	135
III.1. Estado de la técnica.....	137
III.1.1. Introducción	137
III.1.2. Estudios recientes	137
III.1.3. Conclusiones	151

PARTE IV: CASOS DE ESTUDIO	153
IV.1. Empleo del GPS en la compensación.....	155
IV.1.1. Planteamiento de un método adecuado para el uso del GPS	155
IV.1.2. Desarrollo del método	155
IV.1.3. Discusión del método	159
IV.1.4. Exposición del método	160
IV.1.5. Verificación del método	162
IV.1.6. Conclusión	169
IV.2. Métodos para compensar en función de las varillas d, b.....	171
IV.2.1. Estudio de las varillas d, b	171
IV.2.2. Compensación reducida.....	173
IV.2.3. Compensación con varillas d, b considerables	176
IV.2.4. Compensación con varillas d, b nulas o pequeñas: reducción de todo el proceso a un solo borneo de cinco rumbos	179
IV.2.5. Confección de la tablilla de los desvíos residuales a partir de cinco desvíos, usando la regla de Cramer y la ecuación exacta del desvío	185
IV.2.6. Generalización del método expuesto en el epígrafe IV.2.4 para cualquier valor de las varillas d, b	189
IV.3. Selección del rumbo cuadrantal: problemática del quinto rumbo.....	191
IV.3.1. Introducción.....	191
IV.3.2. Hipótesis de la causa: influencia de los desvíos sextantal y octantal	191
IV.3.3. Verificación del resultado obtenido para la determinación del rumbo cuadrantal erróneo	195
IV.3.4. Determinación del signo de los coeficientes F y G, conociendo únicamente los desvíos a los rumbos cardinales, como solución definitiva a la problemática del quinto rumbo	204
IV.3.5. Discusión de los resultados.....	205
IV.3.6. Obtención del coeficiente D a partir de los desvíos a dos rumbos cuadrantales ..	208
IV.4. Método para compensar y confeccionar la tablilla de los desvíos residuales con un solo borneo a cuatro rumbos magnéticos	215
IV.4.1. Planteamiento del método: aplicación de los resultados de los capítulos IV.2 y IV.3	215
IV.4.2. Desarrollo del método: aplicación de la regla de Cramer y reducción de los rumbos a seguir en el borneo	216
IV.4.3. Primera discusión del método: análisis de los sistemas de ecuaciones planteados	218
IV.4.4. Exposición del método y determinación de los coeficientes	221
IV.4.5. Segunda discusión del método: selección del coeficiente del que dependen las varillas d, b.....	226

IV.4.6. Verificación del método	228
IV.4.7. Conclusión	246
CONCLUSIONES	247
ANEXOS: NORMATIVA SOBRE LA COMPENSACIÓN DE AGUJAS NÁUTICAS..I	
A.1. Fundamento	III
A.2. Compendio de normativa.....	V
A.2.1. Resolución A.382(X) de la OMI.....	V
A.2.2. Normativa española: Orden del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de 14 de diciembre de 1992 sobre compensación de agujas náuticas	X
A.2.3. Norma ISO 25862:2019. Anexo G: Compensación del compás magnético.....	XV
A.3. Dispositivos transmisores del rumbo magnético.....	XVII
A.3.1. Introducción	XVII
A.3.2. Resolución MSC.116(73) de la OMI	XX
A.3.3. Resolución MSC.166(78) y Anexo 2 de la Resolución MSC.86(70) de la OMI	XXIV

Lista de símbolos y abreviaturas

i) Esta lista está ordenada alfabéticamente, empezando por el alfabeto latino, y siguiendo por el griego, el cual se reproduce a continuación.

A	α	Alfa	N	v	Ni
B	β	Beta	Ξ	ξ	Xi
Γ	γ	Gamma	O	o	Ómicron
Δ	δ	Delta	Π	π	Pi
E	ε	Épsilon	P	ρ	Ro
Z	ζ	Dseta	Σ	σ	Sigma
H	η	Eta	T	τ	Tau
Θ	θ	Theta*	Y	υ	Ípsilon
I	ι	Iota	Φ	ϕ	Fi
K	κ	Kappa	X	χ	Ji
Λ	λ	Lambda	Ψ	ψ	Psi
M	μ	Mi	Ω	ω	Omega

* Para evitar una ambigüedad con la letra Z del alfabeto latino, se mantiene el nombre tradicional de theta, en lugar de zeta, que es el que actualmente la RAE da a esta letra (Θ , θ).

ii) Respecto de una misma letra, en primer lugar, figuran los símbolos y las abreviaturas que empiezan en mayúsculas, y después, los símbolos y las abreviaturas en minúsculas.

iii) Cuando un mismo símbolo o una misma abreviatura se utiliza para conceptos diferentes, hay tantas entradas como conceptos. Así por ejemplo, R tiene cuatro entradas: componente vertical del campo magnético permanente del buque, momento resistente del compás magnético, resistencia eléctrica y rumbo magnético. Cada entrada se indica por un superíndice en números romanos y entre paréntesis: (i), (ii), etc.

iv) Esta lista no incluye los símbolos de las unidades de medida, las cuales figuran en la Tabla 1: Equivalencias entre las unidades del sistema CGS y del SI.

v) Asimismo, debido a su uso común, tampoco figuran los símbolos de los múltiplos y submúltiplos de las unidades del Sistema Internacional (SI); ni las abreviaturas de los puntos y rumbos cardinales (N, E, S, W) y cuadrantales (NE, SE, SW, NW).

$A^{(i)}$	Área
$A^{(ii)}$	Coefficiente aproximado del desvío, cuya relación con el coeficiente exacto α es: $\alpha = \sin A$
A_i	Coefficiente A cuando el buque tiene una escora i ; el coeficiente exacto α_i es: $\alpha_i = \sin A_i$
\bar{A}	En esta tesis, coeficiente A calculado únicamente a partir de los desvíos a los rumbos cardinales, para diferenciarlo del coeficiente A calculado con los desvíos a los rumbos cardinales y cuadrantales
$a^{(i)}$	Aguja (sufijo): Ra (rumbo de aguja), Da (demora de aguja), Na (norte de aguja), SEa (SE de aguja), 123a (rumbo o demora de aguja 123), etc.
$a^{(ii)}$	Coefficiente del buque relacionado con su magnetismo inducido; se considera como una varilla que tiene sus polos sobre el eje longitudinal (línea de fe) y que es inducida por el componente longitudinal (de proa a popa) del campo magnético terrestre ($X^{(ii)}$); <i>vide</i> Figura 24
a_2	Varilla a residual: la que queda después de la compensación; cuando se ha anulado el coeficiente D, resulta que $a_2 = e_2$
a_i	Varilla a cuando el buque tiene una escora i ; siempre se cumple que $a_i = a$
$B^{(i)}$	Coefficiente aproximado del desvío, cuya relación con el coeficiente exacto β es: $\beta = \sin B + \sin F$
$B^{(ii)}$	Densidad de flujo magnético: flujo magnético (Φ) por unidad de superficie perpendicular al flujo; en el SI, se mide en teslas (T) o en submúltiplos de T, y en el sistema CGS, en gauss (G), siendo $G = Mx \cdot cm^{-2}$ (Mx: máxwell, unidad de Φ)
B'	Coefficiente B observado al W o al E cuando se ha anulado el desvío al rumbo opuesto (E u W)
B''	Coefficiente B cuando se ha anulado el desvío al E o al W, y la mitad (o parte) al rumbo opuesto (W o E); es nulo o prácticamente cero
B_1	Coefficiente B residual después de la compensación preliminar, en el lugar donde esta se efectuó
B_2	Coefficiente B residual después de la compensación preliminar, en un lugar con una latitud magnética notablemente diferente a la del lugar donde se efectuó la compensación preliminar
B_c	Parte del coeficiente B debido a la varilla vertical c
B_i	Coefficiente B cuando el buque tiene una escora i ; el coeficiente exacto β_i es: $\beta_i = \sin B_i$
B_p	Parte del coeficiente B debido al imán longitudinal P
\bar{B}	En esta tesis, coeficiente B calculado únicamente a partir de los desvíos a los rumbos E y W, para diferenciarlo del coeficiente B calculado con los desvíos a los rumbos E y W y a los cuadrantales
b	Coefficiente del buque relacionado con su magnetismo inducido; se considera como una varilla que tiene un polo sobre el eje longitudinal (línea de fe) y que es inducida por el componente transversal (de babor a estribor) del campo magnético terrestre ($Y^{(ii)}$); <i>vide</i> Figura 24
b_i	Varilla b cuando el buque tiene una escora i ; normalmente, $b_i = -c \cdot i \cdot \sin 1^\circ$
$C^{(i)}$	Capacidad electrostática (propiedad de los condensadores eléctricos); se mide en faradios (F)
$C^{(ii)}$	Coefficiente aproximado del desvío, cuya relación con el coeficiente exacto γ es: $\gamma = \sin C - \sin G$
C'	Coefficiente C observado al S o al N cuando se ha anulado el desvío al rumbo opuesto (N o S)

C''	Coeficiente C cuando se ha anulado el desvío al N o al S, y la mitad (o parte) al rumbo opuesto (S o N); es nulo o prácticamente cero
C ₁	Coeficiente C residual después de la compensación preliminar, en el lugar donde esta se efectuó
C ₂	Coeficiente C residual después de la compensación preliminar, en un lugar con una latitud magnética notablemente diferente a la del lugar donde se efectuó la compensación preliminar; normalmente, C ₂ ≈ C ₁
C _f	Parte del coeficiente C debido a la varilla vertical f; normalmente, C _f ≈ 0
CGS	Sistema de unidades de medida cuyas unidades básicas son el centímetro, el gramo y el segundo; este sistema dio paso al MKS, en el cual se basa el SI
C _g	Corrección del compás giroscópico
C _i	Coeficiente C cuando el buque tiene una escora i; el coeficiente exacto γ _i es: γ _i = sin Ci
CMI	Compás Magnético Integral: dispositivo adicional al compás magnético inventado por el profesor Martínez-Lozares de la Universidad del País Vasco; el CMI proporciona el R _v , aplicando la dm y el desvío automáticamente; obtiene la dm a partir de la situación dada por el GPS, y calcula y almacena el valor del desvío a los diferentes rumbos a los que va navegando el buque
COG	<i>Course over ground</i> ; siglas con las que se indica el <i>rumbo efectivo</i> en los equipos de navegación; es proporcionado por un receptor GPS
C _q	Parte del coeficiente C debido al imán transversal Q; normalmente, C _q ≈ C
CT	Corrección total del compás magnético; CT = dm + Δ
\bar{C}	En esta tesis, coeficiente C calculado únicamente a partir de los desvíos a los rumbos N y S, para diferenciarlo del coeficiente C calculado con los desvíos a los rumbos N y S y a los cuadrantales
c ⁽ⁱ⁾	Coeficiente del buque relacionado con su magnetismo inducido; se considera como una varilla que tiene un polo sobre el eje longitudinal (línea de fe) y que es inducida por el componente vertical del campo magnético terrestre (Z); <i>vide</i> Figura 24
c ⁽ⁱⁱ⁾	Velocidad de la luz en el vacío; c = 299 792 458 m·s ⁻¹ ≈ 3·10 ⁸ m·s ⁻¹
c ₂	Varilla c residual: la que queda después de la compensación
c _i ⁽ⁱ⁾	Varilla c cuando el buque tiene una escora i; normalmente, c _i = c
c _i ⁽ⁱⁱ⁾	Varilla c inicial: la que anula la barra Flinders instalada a bordo antes de la compensación
c _r	Varilla c residual: la que se obtiene en el momento de la compensación, estando ya la barra Flinders instalada a bordo
c _t	Varilla c total: es la varilla c que se debe anular en la compensación; c _t = c _i + c _r
D ⁽ⁱ⁾	Coeficiente aproximado del desvío, cuya relación con el coeficiente exacto δ es: δ = sin D
D ⁽ⁱⁱ⁾	Demora: ángulo entre el meridiano y la visual a un objeto; según el meridiano que se tome de referencia, puede ser: de aguja (D _a), magnética (D _m), giroscópica (D _g) o verdadera (D _v)
D _i ⁽ⁱ⁾	Coeficiente D cuando el buque tiene una escora i; el coeficiente exacto δ _i es: δ _i = sin Di
D _i ⁽ⁱⁱ⁾	Coeficiente D inicial: el que anulan las esferas instaladas a bordo antes de la compensación

Dr	Coeficiente D residual: el que se obtiene en el momento de la compensación, estando ya las esferas instaladas a bordo
Drift	En inglés, intensidad horaria de la corriente; es el término empleado en los equipos de navegación para referirse al módulo del vector resultante de la diferencia entre: el vector de dirección COG y módulo SOG, y el vector de dirección HDG y módulo STW
Dt	Coeficiente D total: es el coeficiente D que se debe anular en la compensación; $D_t = D_i + D_r$
DTR/ DTRM	Dispositivo transmisor del rumbo / Dispositivo transmisor del rumbo magnético; en inglés, <i>Transmitting heading device (THD) / Transmitting magnetic heading device (TMHD)</i> ; un DTR es un dispositivo electrónico que detecta y transforma en señal adecuada la información de rumbo de un compás, a fin de transmitirla a otros equipos; un DTRM es un DTR del compás magnético
$d^{(i)}$	Coeficiente del buque relacionado con su magnetismo inducido; se considera como una varilla que tiene un polo sobre el eje transversal (perpendicular a la línea de fe que pasa por el centro de la rosa) y que es inducida por el componente longitudinal (de proa a popa) del campo magnético terrestre ($X^{(ii)}$); <i>vide</i> Figura 24
$d^{(ii)}$	Distancia; en un imán, es la distancia entre sus polos; $d = 5/6 \cdot \ell$; <i>vide</i> ℓ
d_i	Varilla d cuando el buque tiene una escora i; normalmente, $d_i = -g \cdot i \cdot \sin 1^\circ$
dm	Declinación magnética o variación local: ángulo entre los meridianos geográfico y magnético; $\sin dm = Y^{(i)}/H^{(ii)}$; su valor absoluto suele ser menor de 90° , pero en la región entre los polos geográfico y magnético, $X^{(i)}$ es negativo, y $dm > 90^\circ$; por tanto: $dm < 90^\circ$ si $X^{(i)}$ es positivo, y $dm > 90^\circ$ si $X^{(i)}$ es negativo
E	Coeficiente aproximado del desvío, cuya relación con el coeficiente exacto ε es: $\varepsilon = \sin E$
$E_i^{(i)}$	Coeficiente E cuando el buque tiene una escora i; el coeficiente exacto ε_i es: $\varepsilon_i = \sin E_i$
$E_i^{(ii)}$	Coeficiente E inicial: el que anulan las esferas instaladas a bordo antes de la compensación
Er	Coeficiente E residual: el que se obtiene en el momento de la compensación, estando ya las esferas instaladas a bordo
Et	Coeficiente E total: es el coeficiente E que se debe anular en la compensación; $E_t = E_i + E_r$
ECDIS	<i>Electronic Chart Display and Information System</i> / Sistema de Información y Visualización de Cartas Electrónicas
e	Coeficiente del buque relacionado con su magnetismo inducido; se considera como una varilla que tiene sus polos sobre el eje transversal (perpendicular a la línea de fe que pasa por el centro de la rosa) y que es inducida por el componente transversal (de babor a estribor) del campo magnético terrestre ($Y^{(ii)}$); <i>vide</i> Figura 24
e_2	Varilla e residual: la que queda después de la compensación; cuando se ha anulado el coeficiente D, resulta que $e_2 = a_2$
e_i	Varilla e cuando el buque tiene una escora i; normalmente, $e_i = e$
$F^{(i)}$	Coeficiente aproximado del desvío, cuya relación con los coeficientes exactos es: $\sin F = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \beta$
$F^{(ii)}$	Densidad de flujo o intensidad del campo magnético terrestre; en el SI, se mide en teslas (T) o en submúltiplos de T (μT o nT); en el sistema CGS, en oersteds (Oe), y también se puede medir en unidades relativas, llamadas unidades Gauss, tales que en Londres, $H^{(ii)} = 1$

$F^{(iii)}$	Fuerza
F'	Densidad de flujo o intensidad del campo magnético permanente del buque; se mide como $F^{(ii)}$
F''	Densidad de flujo o intensidad del campo magnético inducido del buque; se mide como $F^{(ii)}$
Fd' Fd''	Fuerzas directrices (hacia el Nm o hacia el Sm) debidas a F' y F'' respectivamente; a pesar de la denominación de <i>fuerzas</i> , son densidades de flujo o intensidades de campo magnético
Fe	Fuerza perturbadora total o fuerza al E: $Fe = Fp' + Fp''$
Fn	Fuerza directriz total o fuerza al N: $Fn = H^{(ii)} + Fd' + Fd''$
Fnm	Fuerza directriz media: $Fnm = \lambda \cdot H^{(ii)}$
Fp' Fp''	Fuerzas perturbadoras (hacia el Em o hacia Wm) debidas a F' y F'' respectivamente; a pesar de la denominación de <i>fuerzas</i> , son densidades de flujo o intensidades de campo magnético
Fv	Fuerza vertical que actúa en el compás magnético: $Fv = Z + R^{(i)} + Z'$; a pesar de la denominación de <i>fuerza</i> , es una densidad de flujo o intensidad de campo magnético
Fvm	Fuerza vertical media: $Fvm = \mu^{(i)} \cdot Z$
f	Coefficiente del buque relacionado con su magnetismo inducido; se considera como una varilla que tiene un polo sobre el eje transversal (perpendicular a la línea de fe que pasa por el centro de la rosa) y que es inducida por el componente vertical del campo magnético terrestre (Z); <i>vide</i> Fig. 24
f_2	Varilla f residual: la que queda después de la compensación; esta varilla tiene escaso valor, y no suele compensarse, con lo cual, $f_2 = f$
$f_i^{(i)}$	Varilla f cuando el buque tiene una escora i ; normalmente, $f_i = (e - k) \cdot i \cdot \sin 1^\circ$
$f_i^{(ii)}$	Varilla f inicial: la que anula la barra Flinders instalada a bordo antes de la compensación
f_r	Varilla f residual: la que se obtiene en el momento de la compensación, estando ya la barra Flinders instalada a bordo
f_t	Varilla f total: es la varilla f que se debe anular en la compensación; $f_t = f_i + f_r$
$G^{(i)}$	Coefficiente aproximado del desvío, cuya relación con los coeficientes exactos es: $\sin G = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \gamma$
$G^{(ii)}$	Momento director o giratorio: momento que orienta la aguja náutica; $G = M^{(ii)} \cdot H^{(ii)} \cdot \sin \alpha^{(i)}$
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> / Sistema Global de Navegación por Satélite
GPS	<i>Global Positioning System</i> / Sistema de Posicionamiento Global: GNSS de los Estados Unidos; también se refiere a un receptor de las señales satelitales de dicho sistema, el cual proporciona la situación del buque (o de cualquier otra estación) además de otra información
$g^{(i)}$	Coefficiente del buque relacionado con su magnetismo inducido; se considera como una varilla que tiene un polo sobre el eje vertical que pasa por el centro de la rosa, y que es inducida por el componente longitudinal (de proa a popa) del campo magnético terrestre ($X^{(ii)}$); <i>vide</i> Figura 24
$g^{(ii)}$	Giroscópico/a (sufijo): Rg (rumbo giroscópico), Dg (demora giroscópica), Ng (norte giroscópico), SEg (SE giroscópico), $123g$ (rumbo o demora giroscópico/a 123), etc; Rg también indica el rumbo de grada (se distingue porque se especifica o por el contexto)
g_i	Varilla g cuando el buque tiene una escora i ; normalmente, $g_i = g$

H ⁽ⁱ⁾	Coeficiente aproximado del desvío, cuya relación con los coeficientes exactos es: $\sin H = \frac{1}{2} \cdot \delta^2$
H ⁽ⁱⁱ⁾	Componente horizontal de la densidad de flujo o intensidad del campo magnético terrestre (F ⁽ⁱⁱ⁾)
H ⁽ⁱⁱⁱ⁾	Inductancia electromagnética (propiedad de las bobinas); se mide en henrios (H)
H ^(iv)	Intensidad de campo magnético o coercitividad; en el SI, se mide en amperios por metro (A/m), y en el sistema CGS, en oersteds (Oe)
H'	Componente horizontal de la resultante de las tres fuerzas (concretamente, densidades de flujo o intensidades de campo magnético) que actúan sobre la aguja, las cuales son: F ⁽ⁱⁱ⁾ , F', F''
HDG	<i>Heading</i> ; siglas con las que se indica el <i>rumbo verdadero</i> en los equipos de navegación; es proporcionado por un compás, bien sea giroscópico, magnético o satelital; a la indicación de rumbo del compás, se le deben aplicar las correcciones oportunas para obtener el rumbo verdadero
h	Coeficiente del buque relacionado con su magnetismo inducido; se considera como una varilla que tiene un polo sobre el eje vertical que pasa por el centro de la rosa, y que es inducida por el componente transversal (de babor a estribor) del campo magnético terrestre (Y ⁽ⁱⁱ⁾); <i>vide</i> Figura 24
h _i	Varilla h cuando el buque tiene una escora i; normalmente, $h_i = (e - k) \cdot i \cdot \sin 1^\circ$
I ⁽ⁱ⁾	Intensidad de corriente eléctrica; se mide en amperios (A)
I ⁽ⁱⁱ⁾	Momento de inercia; en el SI, se mide en kilogramos metro cuadrado (kg·m ²)
Ihc	Intensidad horaria de la corriente; se mide en nudos (millas por hora)
IL	Imán longitudinal; plural: ILs; se refiere a imanes correctores alojados en casillas longitudinales
IMO	<i>International Maritime Organization</i> ; <i>vide</i> OMI
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> / Organización Internacional de Normalización: organismo independiente y no gubernamental formado por las organizaciones de normalización de sus Estados miembros; desarrolla Normas (<i>Standards</i>) internacionales voluntarias, facilitando el comercio mundial al proporcionar Normas comunes entre países, de forma que los productos y servicios, al cumplir con estas Normas, devienen seguros, fiables y de calidad para las empresas y los consumidores; su sede se encuentra en Ginebra
IT	Imán transversal; plural: ITs; se refiere a imanes correctores alojados en casillas transversales
Iv	Imán vertical (o conjunto de imanes verticales dentro de un estuche); se refiere al corrector de escora; se emplea v minúscula para diferenciarlo del número romano IV
i	Escora; se considera positiva cuando el buque escora a estribor, y negativa cuando escora a babor
J	Coeficiente del desvío de escora; $\Delta e = J \cdot i \cdot \cos R_a$
J ₁	Coeficiente J residual después de la compensación preliminar, en el lugar donde esta se efectuó
J ₂	Coeficiente J residual después de la compensación preliminar, en un lugar con una latitud magnética notablemente diferente a la del lugar donde se efectuó la compensación preliminar
K ⁽ⁱ⁾	Coeficiente aproximado del desvío, adicional a los demás coeficientes aproximados
K ⁽ⁱⁱ⁾	Constante de Coulomb; $K = 1/(4\pi \cdot \epsilon_0) \approx 9 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-4} \cdot \text{A}^{-2}$
k ⁽ⁱ⁾	Coeficiente del buque relacionado con su magnetismo inducido; se considera como una varilla que tiene sus polos sobre el eje vertical que pasa por el centro de la rosa, y que es inducida por el

	componente vertical del campo magnético terrestre (Z); <i>vide</i> Figura 24
$k^{(ii)}$	Valor genérico de un número natural que actúa como variable en ciertas expresiones; por ejemplo en el binomio de Newton: $(a + b)^n = \sum_k n!/[k!(n - k)!] \cdot a^{n-k} \cdot b^k$; $k = 0, \dots, n$
k_i	Varilla k cuando el buque tiene una escora i; normalmente, $k_i = k$
L	Dimensión de la longitud: unidad genérica de longitud
ℓ	Longitud de un imán o de una bobina; los polos de un imán se encuentran aproximadamente a 1/12 de sus extremos, con lo cual, siendo d la distancia entre los polos, $d^{(ii)} = 10/12 \cdot \ell = 5/6 \cdot \ell$
ℓ'	Longitud de un imán; se emplea cuando se hace referencia a dos longitudes: una es ℓ y la otra ℓ'
$M^{(i)}$	Dimensión de la masa: unidad genérica de masa
$M^{(ii)}$	Momento magnético de un imán; $M = m^{(iii)} \cdot d^{(ii)}$; en el SI, se mide en amperios metro cuadrado ($A \cdot m^2$)
M'	Momento magnético; se emplea cuando se hace referencia a dos momentos: uno es M y el otro M'
MKS	Sistema de unidades de medida cuyas unidades básicas son el metro, el kilogramo y el segundo
MKSA	Sistema MKS considerando el amperio (A) como unidad básica; el sistema MKSA incorpora las unidades prácticas eléctricas usadas en el sistema CGS (amperio, culombio, faradio, henrio, ohmio, vatio, voltio), pero evita que estas unidades se expresen como potencias de 10 de las unidades básicas (por ejemplo: V (voltio) = $10^8 \text{ cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-2}$); la supresión de las potencias de 10 se consigue introduciendo una unidad eléctrica como básica, habiéndose escogido el amperio por la facilidad de medir la intensidad de corriente eléctrica
$m^{(i)}$	Magnético/a (sufijo); Rm (rumbo magnético), Dm (demora magnética), Nm (norte magnético), SEm (SE magnético), 123m (rumbo o demora magnético/a 123), etc.
$m^{(ii)}$	Masa
$m^{(iii)}$	Masa magnética del polo de un imán; en el SI, se mide en amperios metro ($A \cdot m$)
m'	Masa o masa magnética; se emplea cuando se hace referencia a dos masas: una es m y la otra m'
$N^{(i)}$	Dimensión de la masa magnética: unidad genérica de masa magnética
$N^{(ii)}$	Número de las divisiones de una balanza de inclinación; si a bordo, la balanza queda horizontal en la división n, y en tierra (sin perturbaciones magnéticas), en la N, resulta: $\mu^{(i)} = n/N$ (<i>vide</i> $\mu^{(i)}$, μ_2)
n	Número de las casillas donde se alojan los imanes correctores; número de las divisiones de una balanza de inclinación (<i>vide</i> $N^{(ii)}$); número de espiras de una bobina; en general, cualquier número
OMI	Organización Marítima Internacional: organismo especializado de la ONU (Organización de las Naciones Unidas) que promueve la cooperación entre Estados y la industria del transporte para mejorar la seguridad marítima y para prevenir la contaminación marina; fue creada en 1948 con carácter de ente consultivo, denominándose Organización Consultiva Marítima Intergubernamental (OCMI; IMCO en inglés), pero en 1977 cambió su nombre por el actual; es la responsable de la elaboración de los convenios internacionales en materia de seguridad marítima y prevención de la contaminación; su sede se encuentra en Londres
$P^{(i)}$	Componente longitudinal de F' (sobre la línea de fe); también se considera como un imán
$P^{(ii)}$	Potencia; se mide en vatios (W)

Pa	Potencia absoluta de los imanes correctores: desvío que corrige una pareja de ILs instalados en la casilla 1 de una bitácora, estando el buque en Glasgow; $P_a = 0,45$ unidades Gauss
Pi	Imán P cuando el buque tiene una escora i; $P_i = P$
Pr	Potencia relativa de los imanes correctores; $P_r = P_a/H^{(ii)}$
p	Peso
$Q^{(i)}$	Componente transversal de F' (sobre la perpendicular a la línea de fe que pasa por el centro de la rosa); también se considera como un imán
$Q^{(ii)}$	Carga eléctrica; se mide en culombios (C) o en amperios hora (A·h)
Q'	Carga eléctrica; se emplea cuando se hace referencia a dos cargas: una es Q y la otra Q'
Q_i	Imán Q cuando el buque tiene una escora i; $Q_i = Q - R \cdot i \cdot \sin 1^\circ$
$R^{(i)}$	Componente vertical de F' (sobre la vertical que pasa por el centro de la rosa); también se considera como un imán
$R^{(ii)}$	Momento resistente del compás magnético; se debe al rozamiento, y se opone al momento director
$R^{(iii)}$	Resistencia eléctrica; se mide en ohmios (Ω)
$R^{(iv)}$	Rumbo magnético; para simplificar la notación, $R_m = R$
R'	Rumbo de aguja; para simplificar la notación, $R_a = R'$
$R_c^{(i)}$	Rumbo de la corriente
$R_c^{(ii)}$	Rumbo magnético <i>corregido</i> : es el R_a que se leería a un R_m cuadrantal si $D = 0$, o lo que es lo mismo, el rumbo R_a al que se debe dejar el compás magnético para anular el coeficiente D cuando se sigue un R_m cuadrantal; es un concepto introducido en esta tesis
Rg	Rumbo de grada: R_m al cual fue construido el buque; también indica el rumbo giroscópico (se distingue porque se especifica o por el contexto)
Ri	Imán R cuando el buque tiene una escora i; $R_i = R + Q \cdot i \cdot \sin 1^\circ$
r	Radio; en una balanza de inclinación, es la distancia entre su centro y el contrapeso; $r = n \cdot u$
S	Rumbo efectivo; es proporcionado por un receptor GPS; en los equipos de navegación, se indica por COG: <i>course over ground</i> / rumbo sobre el fondo; <i>vide</i> Sx justo debajo
Sx	Rumbo efectivo cuando el buque sigue el $R_a = X$; por ejemplo: S_n (rumbo efectivo cuando se navega al $R_a = N$), S_{se} (rumbo efectivo cuando se navega al $R_a = SE$)
Set	En inglés, rumbo de la corriente; es el término empleado en los equipos de navegación para referirse a la dirección del vector resultante de la diferencia entre: el vector de dirección COG y módulo SOG, y el vector de dirección HDG y módulo STW
SI	Sistema Internacional de Unidades: sistema de unidades de medida basado en el sistema MKSA, añadiendo las siguientes tres unidades básicas: el kelvin (K) para la temperatura, la candela (cd) para la intensidad luminosa y el mol (mol) para la cantidad de sustancia
SIVCE	Sistema de Información y Visualización de Cartas Electrónicas; en inglés, ECDIS

SOG	<i>Speed over ground</i> ; siglas con las que se indica la <i>velocidad efectiva</i> en los equipos de navegación; es proporcionada por un receptor GPS
SOLAS	Siglas de <i>Safety Of Life At Sea</i> , en referencia al Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar, 1974, enmendado / <i>International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, as amended</i> , elaborado por la OMI y ratificado por todos sus Estados miembros; es el principal tratado internacional sobre seguridad marítima, además del más antiguo, a excepción del Reglamento de Abordajes; su primera edición se redactó en 1914, en respuesta a la catástrofe del <i>Titanic</i> ; la versión actual es la quinta, de 1974; el Convenio está en constante actualización, mediante Resoluciones de la OMI, entre las que destaca, a efectos de navegación, la Resolución MSC.99(73), por medio de la cual, en diciembre de 2000, la OMI adoptó una versión revisada del Capítulo V: <i>Seguridad de la navegación</i> , actualizándolo e incorporando nuevas prescripciones que entraron en vigor el 1 de julio de 2002
STCW	Siglas de <i>Standards of Training, Certification and Watchkeeping</i> , en referencia al Convenio internacional sobre normas de formación, titulación y guardia para la gente de mar / <i>International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers</i> , elaborado por la OMI en 1978, el cual establece los requisitos mínimos sobre dichos aspectos que deben cumplir diferentes cargos a bordo; ha tenido dos modificaciones sustanciales, una en 1995 y otra en 2010; la modificación 2010 (enmiendas de Manila) ha sido debida a la necesidad de adaptar la formación náutica a las nuevas tecnologías, especialmente a la cartografía electrónica y a la instrucción en simuladores
STW	<i>Speed through water</i> ; siglas con las que se indica la <i>velocidad de máquina o propia del buque</i> en los equipos de navegación; es proporcionada por una corredera
T ⁽ⁱ⁾	Dimensión del tiempo: unidad genérica de tiempo
T ⁽ⁱⁱ⁾	Periodo del compás magnético en un lugar sin perturbaciones magnéticas
T', T _x	T': Periodo del compás magnético a bordo y a un determinado rumbo de aguja; T _x : T' al Ra = X
TFG/ TFM	Trabajo de fin de grado / trabajo de fin de máster
THD	<i>Transmitting heading device</i> / Dispositivo transmisor del rumbo; <i>vide</i> DTR
TMHD	<i>Transmitting magnetic heading device</i> / Dispositivo transmisor del rumbo magnético; <i>vide</i> DTR/DTRM
U	Potencial eléctrico; se mide en voltios (V)
u	Unidad genérica; en una balanza de inclinación, es la distancia entre divisiones sucesivas
V	Velocidad
v	Verdadero/a (sufijo): R _v (rumbo verdadero), D _v (demora verdadera), N _v (norte verdadero), SE _v (SE verdadero), 123 _v (rumbo o demora verdadero/a 123), etc.
V _{ef}	Velocidad efectiva; es proporcionada por un receptor GPS; en los equipos de navegación, se indica por SOG: <i>speed over ground</i> / velocidad sobre el fondo
V _m	Velocidad de máquina o propia del buque; es proporcionada por una corredera; en los equipos de navegación, se indica por STW: <i>speed through water</i> / velocidad a través del agua
w	Factor introducido en esta tesis; $w = lhc/Vm \cdot \csc 1^\circ$; se desglosa en $x = w \cdot \cos Rc$, $y = w \cdot \sin Rc$; los componentes x, y intervienen en las expresiones de los pseudodesvíos (Ψ)

$X^{(i)}$	Componente de $H^{(ii)}$ que se dirige hacia el Nv; generalmente es positivo, aunque en la región entre los polos geográfico y magnético, es negativo (o sea: se dirige hacia el Sv); cuando X es positivo el valor absoluto de la dm es menor de 90° , mientras que cuando X es negativo, el valor absoluto de la dm es mayor de 90° , siendo su expresión en ambos casos: $\sin dm = Y^{(i)}/H^{(ii)}$
$X^{(ii)}$	Componente longitudinal de $H^{(ii)}$ (sobre la línea de fe); en compensación de agujas náuticas, conviene descomponer H según los ejes propios del buque ($X^{(ii)}$, $Y^{(ii)}$), en lugar de hacerlo según los meridianos y paralelos ($X^{(i)}$, $Y^{(i)}$)
X'	Componente longitudinal de F'' (sobre la línea de fe); depende de las varillas a, b, c, las cuales tienen un polo sobre el eje longitudinal; $X' = a \cdot X^{(ii)} + b \cdot Y^{(ii)} + c \cdot Z$
X_i	Componente longitudinal de $F^{(ii)}$ (sobre la línea de fe) cuando el buque tiene una escora i; $X_i = X^{(ii)}$
X'_i	Componente longitudinal de F'' (sobre la línea de fe) cuando el buque tiene una escora i; $X'_i = a_i \cdot X + b_i \cdot Y + c_i \cdot Z$
x	Factor introducido en esta tesis; $x = w \cdot \cos Rc$; <i>vide w</i>
$Y^{(i)}$	Componente de $H^{(ii)}$ que se dirige hacia el E/Wv; es positivo cuando se dirige hacia el Ev, y negativo cuando se dirige hacia el Wv
$Y^{(ii)}$	Componente transversal de $H^{(ii)}$ (sobre la perpendicular a la línea de fe que pasa por el centro de la rosa); en compensación de agujas náuticas, conviene descomponer H según los ejes propios del buque ($X^{(ii)}$, $Y^{(ii)}$), en lugar de hacerlo según los meridianos y paralelos ($X^{(i)}$, $Y^{(i)}$)
Y'	Componente transversal de F'' (sobre la perpendicular a la línea de fe que pasa por el centro de la rosa); depende de las varillas d, e, f, las cuales tienen un polo sobre el eje transversal; $Y' = d \cdot X^{(ii)} + e \cdot Y^{(ii)} + f \cdot Z$
Y_i	Componente transversal de $F^{(ii)}$ cuando el buque tiene una escora i; es decir: componente de F sobre la perpendicular a la línea de fe que pasa por el centro de la rosa y es paralela a la cubierta, en lugar de estar contenida en el plano de la rosa; se considera este eje ya que: debido a la suspensión cardán, la rosa permanece horizontal cuando el buque está escorado, pero la inducción de los hierros dulces se produce según los ejes propios del buque, y por tanto, hay que desglosar los componentes $X^{(ii)}$, $Y^{(ii)}$, Z (referenciados según el plano de la rosa) en función de los ejes longitudinal, transversal y vertical propios del buque: X_i , Y_i , Z_i ; siendo $Y_i = Y^{(ii)} \cdot \cos i + Z \cdot \sin i$
Y'_i	Componente transversal de F'' (sobre la perpendicular a la línea de fe que pasa por el centro de la rosa y que está contenida en el plano de la rosa) cuando el buque tiene una escora i; $Y'_i = d_i \cdot X + e_i \cdot Y + f_i \cdot Z$
$y^{(i)}$	Distancia vertical entre el centro de la rosa y un imán corrector
$y^{(ii)}$	Factor introducido en esta tesis; $y = w \cdot \sin Rc$; <i>vide w</i>
Z	Componente vertical de la densidad de flujo o intensidad del campo magnético terrestre ($F^{(ii)}$); este componente se dirige hacia abajo en el hemisferio Nm y hacia arriba en el Sm, siendo Z positivo cuando se dirige hacia abajo, y negativo cuando se dirige hacia arriba
Z'	Componente vertical de F'' (sobre el eje vertical que pasa por el centro de la rosa); depende de las varillas g, h, k, las cuales tienen un polo sobre el eje vertical; $Z' = g \cdot X + h \cdot Y + k \cdot Z$
Z_i	Componente vertical de la densidad de flujo o intensidad del campo magnético terrestre ($F^{(ii)}$) cuando el buque tiene una escora i; <i>vide Y_i</i> (Z_i actúa sobre el eje vertical propio del buque que pasa por el centro de la rosa, el cual es perpendicular a la cubierta, mientras que Y_i actúa sobre el eje paralelo a la cubierta); $Z_i = Z \cdot \cos i - Y^{(ii)} \cdot \sin i$

Z_i	Componente vertical de F'' (sobre el eje vertical a la rosa que pasa por su centro) cuando el buque tiene una escora i ; $Z_i = g_i \cdot X + h_i \cdot Y + k_i \cdot Z$
z	Relación entre: la distancia vertical del centro de la rosa a un imán corrector, y la longitud del imán; $z = y^{(i)}/\ell$
$\alpha^{(i)}$	Ángulo que el compás magnético se separa de la dirección de $H^{(ii)}$ o H' debido a una perturbación, por ejemplo una escora (<i>vide</i> Δe)
$\alpha^{(ii)}$	Coefficiente exacto del desvío; es debido a las varillas d, b ; $\alpha = (d - b)/(2\lambda)$
α_i	Coefficiente α cuando el buque tiene una escora i ; $\alpha_i = (d_i - b_i)/(2\lambda) = (-g + c)/(2\lambda) \cdot i \cdot \sin 1^\circ$
$\beta^{(i)}$	Ángulo de equilibrio entre el momento director (G) y el momento resistente (R); es el valor del ángulo $\alpha^{(i)}$ cuando se da dicha condición de equilibrio
$\beta^{(ii)}$	Coefficiente exacto del desvío; es debido al imán P y a la varilla vertical c ; $\beta = P/(\lambda \cdot H) + c/\lambda \cdot \tan \theta$
β_i	Coefficiente β cuando el buque tiene una escora i ; $\beta_i = P_i/(\lambda \cdot H) + c_i/\lambda \cdot \tan \theta = P/(\lambda \cdot H) + c/\lambda \cdot \tan \theta = \beta$
γ	Coefficiente exacto del desvío; es debido al imán P y a la varilla vertical f ; $\gamma = Q/(\lambda \cdot H) + f/\lambda \cdot \tan \theta$
γ_i	Coefficiente γ cuando el buque tiene una escora i ; $\gamma_i = Q_i/(\lambda \cdot H) + f_i/\lambda \cdot \tan \theta = (Q - R \cdot i \cdot \sin 1^\circ)/(\lambda \cdot H) + (e - k)/\lambda \cdot i \cdot \sin 1^\circ \cdot \tan \theta$
Δ	Desvío del compás magnético; su ecuación exacta es: $\sin \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin Ra + \gamma \cdot \cos Ra + \delta \cdot \sin (2Ra + \Delta) + \varepsilon \cdot \cos (2Ra + \Delta)$; como serie de Fourier, $\Delta = A + B \cdot \sin Ra + C \cdot \cos Ra + D \cdot \sin 2Ra + E \cdot \cos 2Ra + F \cdot \sin 3Ra + G \cdot \cos 3Ra + H \cdot \sin 4Ra + K \cdot \cos 4Ra + \dots$; y su fórmula práctica es: $\Delta = A + B \cdot \sin Ra + C \cdot \cos Ra + D \cdot \sin 2Ra + E \cdot \cos 2Ra$; <i>vide</i> Δx justo debajo
Δx	Desvío cuando el buque sigue el $Ra = X$; por ejemplo: Δ_n (desvío al N), Δ_{se} (desvío al SE), $\Delta_{123} = \Delta(123)$ (desvío al $Ra = 123$); Δ_e (desvío al E) también indica desvío de escora (se distingue porque se especifica o por el contexto)
$\Delta'x$	Desvío al $Ra = X$ tras haber actuado sobre los correctores; solo se emplea cuando interesa distinguir entre: el desvío antes de actuar sobre los correctores (Δx) y el de después ($\Delta'x$); $\Delta'x$ es nulo o prácticamente cero; $\Delta'e,w = A \pm B' - E$; $\Delta'n,s = A \pm C' + E$; <i>vide</i> B', C'
$\Delta''x$	Desvío al $Ra = X$ tras haber actuado por segunda sobre los correctores; solo se emplea cuando interesa distinguir entre: el desvío a un rumbo cardinal antes de actuar sobre los imanes correctores (Δx), el de después de haber actuado sobre los imanes al $Ra = X$ ($\Delta'x$) y el que se origina al actuar sobre los imanes al $Ra = X + 180$ ($\Delta''x$); a diferencia de $\Delta'x$, $\Delta''x$ no suele ser nulo; $\Delta''e,w = A \pm B'' - E$; $\Delta''n,s = A \pm C'' + E$; <i>vide</i> B'', C''
Δ_1	Desvío obtenido al primer rumbo cuadrantal cuando se aplica el método expuesto en esta tesis para compensar y levantar la tablilla de desvíos con un solo borneo a cuatro rumbos magnéticos
Δ_2	Desvío obtenido al segundo rumbo cuadrantal cuando se aplica el método expuesto en esta tesis para compensar y levantar la tablilla de desvíos con un solo borneo a cuatro rumbos magnéticos; el segundo rumbo cuadrantal es el opuesto del primero
Δc	Desvío cuadrantal: parte del desvío que depende del doble del Ra ; $\Delta c = D \cdot \sin 2Ra + E \cdot \cos 2Ra$; se anula y es máximo a cuatro rumbos

Δ_e	Desvío de escora; los balances hacen que la aguja oscile a causa de la variación del desvío con la escora, ya que el componente vertical del campo magnético debido a los hierros del buque ($R + Z'$) incide en el plano de la rosa, creando un desvío diferente para cada escora; para una escora i , $\Delta_e = \Delta_i - \Delta$, y con la aguja compensada, $\Delta_e \approx \Delta_i$; el factor que más incide en Δ_i es el imán vertical R , el cual se debe anular con el corrector de escora (Iv); Δ_e también indica desvío al E (se distingue porque se especifica o por el contexto)
Δ_g	Desvío al rumbo de grada (Rg); solo es debido a las varillas c, f , ya que los imanes P, Q no causan ningún desvío al Rg ; además, normalmente solo incide la varilla c , siendo $f \approx 0$
Δ_i	Desvío cuando el buque tiene una escora i ; en las ecuaciones de este desvío, se deben considerar los coeficientes $\alpha_i, \dots, \varepsilon_i, A_i, \dots, E_i$
Δ_o	Desvío octantal: parte del desvío que depende del cuádruple del Ra ; $\Delta_o = H \cdot \sin 4Ra + K \cdot \cos 4Ra$; se anula y es máximo a ocho rumbos
Δ_{pc}	Δ_{px} cuando X es el único rumbo cuadrantal que se considera; <i>vide</i> Δ_{px}
Δ_{px}	Desvío a un rumbo próximo al $R_m = X$, el cual se considera como Δ_x ; se emplea cuando se sigue una enfilación próxima a un R_m cardinal o cuadrantal, pero que no coincide exactamente con él
Δ_{sc}	Desvío semicircular: parte del desvío que depende del Ra , pero de ningún otro múltiplo de él; $\Delta_{sc} = B \cdot \sin Ra + C \cdot \cos Ra$; se anula y es máximo a dos rumbos
Δ_{sx}	Desvío sextantal: parte del desvío que depende del triple del Ra ; $\Delta_{sx} = F \cdot \sin 3Ra + G \cdot \cos 3Ra$; se anula y es máximo a seis rumbos
δ	Coefficiente exacto del desvío; es debido a las varillas a, e ; $\delta = (a - e)/(2\lambda)$
δ_i	Coefficiente δ cuando el buque tiene una escora i ; $\delta_i = (a_i - e_i)/(2\lambda) = (a - e)/(2\lambda) = \delta$
$\delta_{R'}$	Deriva del buque cuando sigue el rumbo de aguja R'
$\varepsilon^{(i)}$	Coefficiente exacto del desvío; es debido a las varillas d, b ; $\varepsilon = (d + b)/(2\lambda)$
$\varepsilon^{(ii)}$	Permitividad eléctrica relativa de un medio (en el vacío, su valor 1); es adimensional
ε_0	Permitividad eléctrica del vacío; $\varepsilon_0 = c^{-2} \cdot \mu_0^{-1}$; <i>vide</i> $K^{(ii)}$: constante de Coulomb
ε_i	Coefficiente ε cuando el buque tiene una escora i ; $\varepsilon_i = (d_i + b_i)/(2\lambda) = -(g + c)/(2\lambda) \cdot i \cdot \sin 1^\circ$
η	Factor introducido en esta tesis; es el error medio del desvío cuando se aplica la fórmula práctica (<i>vide</i> Δ) a los rumbos cuadrantales; su valor no es significativo, a diferencia del error máximo (ξ) que tiene el desvío a uno de los cuatro rumbos cuadrantales; $\eta = 2K^{(i)}$
Θ	Sumatorio de términos que se obvian al considerar la fórmula práctica del desvío con respecto a la ecuación aproximada que tiene en cuenta los desvíos sextantal y octantal; $\Theta = -K + F \cdot \sin Ra - G \cdot \cos Ra + F \cdot \sin 3Ra + G \cdot \cos 3Ra + K \cdot \cos 4Ra$; <i>vide</i> Θ_x justo debajo
Θ_x	Θ correspondiente al $Ra = X$
Θ_1, Θ_2	Coefficientes empleados en un método de compensación propuesto por el profesor Lushnikov de la Academia Marítima de Stettin (Polonia); Lushnikov los denomina Δ_1, Δ_2 ; no tienen relación con Θ
θ	Inclinación magnética o latitud magnética: ángulo que forma el flujo magnético terrestre con plano del horizonte; se dirige hacia abajo en el hemisferio Nm y hacia arriba en el Sm; $\tan \theta = Z/H$

λ	Coeficiente de la fuerza directriz media antes de la compensación; indica la cantidad promedio (en tanto por uno) del componente $H^{(ii)}$ que hay en el lugar del compás magnético; $\lambda = 1 + (a + e)/2$
λ_2	Coeficiente λ después de la compensación, cuando resulta $a_2 = e_2$; $\lambda_2 = 1 + (a_2 + e_2)/2 = 1 + e_2$; teóricamente, es igual que μ_2 ; recibe el nombre de factor del barco
$\mu^{(i)}$	Coeficiente de la fuerza vertical media antes de la compensación; indica la cantidad promedio (en tanto por uno) del componente Z que hay en el lugar del compás magnético; $\mu = 1 + k^{(i)} + R^{(i)}/Z$
$\mu^{(ii)}$	Permeabilidad magnética relativa de un medio (en el vacío, su valor es 1); es adimensional
μ_0	Permeabilidad magnética del vacío; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$; es una constante introducida en el sistema MKSA para eliminar las potencias de 10 de las unidades eléctricas (<i>vide</i> MKSA); también contiene el factor 4π , debido a que el sistema MKSA emplea las fórmulas que se denominan racionalizadas, las cuales contienen dicho factor
μ_2	Coeficiente μ después de la compensación; teóricamente, es igual que λ_2 ; $\mu_2 = \lambda_2 = 1 + e_2$; recibe el nombre de factor del barco
ξ	Factor introducido en esta tesis; es el error máximo del desvío cuando se aplica la fórmula práctica (<i>vide</i> Δ) a los rumbos cuadrantales; se da a un solo rumbo cuadrantal; <i>vide</i> η
π	Número pi: relación entre el perímetro y el diámetro de todo círculo; $\pi \approx 3,141\ 592\ 653\ 589\ 793$
Φ	Flujo magnético: número de líneas de fuerza de un campo magnético que pasan por una superficie perpendicular a ellas; indica la energía que pasa por dicha superficie; en el SI, se mide en wébbers (Wb), y en el sistema CGS, en máxwells (Mx)
φ	Latitud de un punto de la Tierra: distancia esférica entre el punto y el ecuador; las latitudes N se consideran positivas, y las S, negativas
$\chi^{(i)}$	Brazo del momento director (G): $\chi = d^{(ii)} \cdot \sin \alpha^{(i)}$; <i>vide</i> Figura 7
$\chi^{(ii)}$	Ángulo del triángulo de velocidades opuesto al lado correspondiente a V_m ; <i>vide</i> Figura 71
Ψ	Pseudodesvío: diferencia entre el rumbo efectivo y el de aguja; $\Psi = S - R_a$; es un concepto introducido en esta tesis, con el fin de poder confeccionar la tablilla de los desvíos residuales a partir de los rumbos efectivos que proporciona un receptor GPS; <i>vide</i> Ψ_x justo debajo
Ψ_x	Pseudodesvío cuando el buque sigue el $R_a = X$; por ejemplo: Ψ_n (pseudodesvío al N: Ψ cuando se navega al $R_a = N$), Ψ_{se} (pseudodesvío al SE: Ψ cuando se navega al $R_a = SE$)
ω	Ángulo relativo al desvío semicircular; $\tan \omega = C/B$; $\Delta_{sc} = \sin(R_a + \omega) \cdot \sqrt{B^2 + C^2}$; el cuadrante de ω depende de los signos de B, C: si B es positivo, ω pertenece al primer o al cuarto cuadrante (según el signo de C), y si B es negativo, al segundo o al tercero (según el signo de C)
ω'	Ángulo relativo al desvío cuadrantal; $\tan 2\omega' = E/D$; $\Delta_c = \sin 2(R_a + \omega') \cdot \sqrt{D^2 + E^2}$; corresponde al ángulo que se deben girar las esferas respecto de la perpendicular a la línea de fe; el cuadrante de $2\omega'$ depende de los signos de D, E, de manera análoga al cuadrante de ω (<i>D por B, y E por C</i>)
ω''	Ángulo que se debe girar la barra Flinders; depende de las varillas c, f; $\tan \omega'' = f/c$; el cuadrante de ω'' depende de los signos de c, f, de manera análoga al cuadrante de ω (<i>-c por B, y -f por C</i>)
ω'''	Ángulo relativo al rumbo de grada (Rg): $R_g = 180 - \omega'''$, siendo $\tan \omega''' = C_q/B_p$, y normalmente, $\tan \omega''' = C/B_p$, ya que C_f suele ser nulo o casi cero; el cuadrante de ω''' depende de los signos de B_p , C_q , de manera análoga al cuadrante de ω (<i>B_p por B, y C_q por C</i>)

Lista de Figuras

Figura 1. Líneas de fuerza. Fuente: http://1.bp.blogspot.com/_Sw4A4QAD55I/SviMSz_TPkI/AAAAAAAAAHk/8ZyIUn5us8c/s320/Dibujo5.bmp	6
Figura 2. Dirección de las líneas de fuerza alrededor de un punto. Fuente: Propia.	9
Figura 3. Inducción de una barra por el componente horizontal del campo magnético terrestre. Fuente: Propia.	11
Figura 4. Manifestación del magnetismo subpermanente al cambiar el rumbo. Fuente: Propia.	12
Figura 5. Mortero de una aguja líquida. Fuente: Propia.	13
Figura 6. Partes de una bitácora. Fuente: Propia.	14
Figura 7. Fuerzas causantes del momento director. Fuente: Propia.	15
Figura 8. Disposición de los imanes en la rosa: casos más usuales. Fuente: Moréu, 1987, p. 71.	18
Figura 9. Imán representativo del magnetismo terrestre. Fuente: Propia.	31
Figura 10. Elementos del campo magnético terrestre. Fuente: Propia.	32
Figura 11. Carta isógona. Fuente: WMM2020. p. 73.	33
Figura 12. Carta isodinámica total. Fuente: WMM2020. p. 72.	34
Figura 13. Carta isodinámica horizontal. Fuente: WMM2020. p. 72.	34
Figura 14. Carta isodinámica vertical. Fuente: WMM2020. p. 71.	35
Figura 15. Carta isoclina. Fuente: WMM2020. p. 73.	35
Figura 16. Carta isalogónica. Fuente: WMM2020. p. 85.	36
Figura 17. Descomposición de la fuerza F según los ejes propios del buque. Fuente: Propia.	39
Figura 18. Fuerzas debidas al magnetismo permanente del buque. Fuente: Propia.	40
Figura 19. Fuerzas directrices y perturbadoras debidas al magnetismo permanente del buque. Fuente: Propia.	40
Figura 20. Magnetismo inducido: sustitución del efecto de los hieros dulces del buque por nueve varillas. Fuente: Propia.	42
Figura 21. Polarización y efecto de las varillas b a proa del compás. Fuente: Propia.	43
Figura 22. Polarización y efecto de las varillas b a estribor del compás. Fuente: Propia.	43
Figura 23. Varilla a negativa. Fuente: Propia.	44
Figura 24. Signos de las varillas. Fuente: Propia.	45
Figura 25. Relación entre los componentes relativos al buque (X, Y, Z) y H, θ . Fuente: Propia.	46
Figura 26. Fuerzas determinantes del desvío a un rumbo magnético dado. Fuente: Propia.	47
Figura 27. Buque asimétrico. Fuente: https://pcl.ec/fusion/ . (izda.).....	53
Figura 28. Buque con la línea de fe desplazada de la línea de crujía (portaerones Juan Carlos I). Fuente: http://www.hispaviacion.es/lhd-juan-carlos-i-ganar-el-cielo-desde-el-mar/ . (dcha.).....	53
Figura 29. Fuerza productora del desvío semicircular. Ejemplo con un β negativo y un γ positivo. Fuente: Propia.....	55
Figura 30. Fuerza productora del desvío cuadrantal. Ejemplo con un δ y un ϵ positivos. Fuente: Propia.	56
Figura 31. Curva de los desvíos (resolución del Ejercicio 8). Fuente: Propia.....	69
Figura 32. Acción conjunta de los dos polos de un imán corrector sobre el N de la aguja. Fuente: Propia.	77

Figura 33. Desvíos causados por las varillas –a, –e. Fuente: Propia..... 80

Figura 34. Varillas a, e antes y después de la compensación. Fuente: Propia..... 95

Figura 35. Efecto del cambio de latitud magnética sobre los desvíos causados por los imanes Q, P. Fuente: Propia..... 97

Figura 36. Efecto del cambio de latitud magnética sobre el desvío causado por una varilla vertical –c en el hemisferio N magnético. Fuente: Propia..... 98

Figura 37. Desvío invariable causado por una varilla horizontal +a. Fuente: Propia..... 98

Figura 38. Giro de la barra Flinders para anular simultáneamente las varillas c, f. Fuente: Propia..... 106

Figura 39. Descomposición de Q, R en el plano transversal. Fuente: Propia..... 115

Figura 40. Descomposición de Y, Z en el plano transversal. Fuente: Propia..... 116

Figura 41. Disposición de los imanes verticales dentro del estuche. Fuente: Propia..... 121

Figura 42. Balanza de inclinación. Fuente: Propia..... 125

Figura 43. Efecto de los dos polos de la barra Flinders sobre la aguja en el hemisferio N. Fuente: Propia..... 127

Figura 44. Inducción de la barra Flinders por el componente H. Fuente: Propia..... 127

Figura 45. Inducción de la barra Flinders por el corrector de escora. Fuente: Propia..... 128

Figura 46. Valores críticos de H en el hemisferio N. Fuente: https://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/compass-en.php..... 129

Figura 47. Carta isodinámica horizontal de la región ártica. Fuente: WMM2020. p. 77. 130

Figura 48. Carta isodinámica horizontal de la región antártica. Fuente: WMM2020. p. 84. 130

Figura 49. Carta isógona de la región ártica. Fuente: WMM2020. p. 80. 133

Figura 50. Carta isógona de la región antártica. Fuente: WMM2020. p. 87. 133

Figura 51. Desvioscopio con las tres esferas propuestas por el profesor Gea. Fuente: Gea, 2003, p. 172. 138

Figura 52. Experimentación con el modelo de tres esferas. Fuente: Gea, 2003, p. 185..... 139

Figura 53. Panel PC del CMI conectado a un compás magnético estándar. Fuente: https://www.ehu.es/es/-/ti_201610_josu-arribalzaga-campusa?p_1_back_url=https%3A%2F%2Fwww.ehu.es%2F%2Fcampusa%2Fnewsletter%3Fp_p_id%3Doom_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dmaximized%26p_p_mode%3Dview%26_com_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet_redirect%3Dhttps%253A%252F%252Fwww.ehu.es%252F%252Fcampusa%252Fnewsletter%253Fp_p_id%253Doom_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet%2526p_p_lifecycle%253D0%2526p_p_state%253Dnormal%2526p_p_mode%253Dview%26_com_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet_mvPath%3D%252Fsearch.jsp%26_com_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet_keywords%3DArribalzaga%2BAurre%26_com_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet_formDate%3D1626516927379%26_com_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet_scope%3Deverything..... 140

Figura 54. CMI indicando el rumbo de aguja; el menú con las opciones de rumbo, y los coeficientes A, ...,E. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 133..... 141

Figura 55. CMI indicando el rumbo satelital; la tablilla de los desvíos, y los coeficientes A, ...,E. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 134..... 141

Figura 56. Tablilla de los desvíos proporcionada por el CMI, según estén obtenidos directamente por comparación del rumbo verdadero con el de aguja, teniendo en cuenta la dm (arithmetic), o calculados por la fórmula práctica del desvío (deviation). Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 116..... 141

Figura 57. Despiece del plato de compensación del dispositivo del profesor Arribalzaga. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 96..... 142

Figura 58. Despiece del soporte del plato de compensación. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 96..... 142

Figura 59. Imanes empleados en el dispositivo y relación de su tamaño. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 104..... 142

Figura 60. Dispositivo compensador montado, listo para colocar en una bitácora. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 97..... 142

Figura 61. Bitácora adaptada al dispositivo compensador. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 103.....	142
Figura 62. Mortero instalado en la bitácora con el dispositivo del profesor Arribalzaga. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 113.....	143
Figura 63. Curvas de los desvíos residuales del buque ALLURE OF THE SEAS, según sea el rumbo cuadrantal que se considere en la ecuación práctica del desvío, además de la curva obtenida con el coeficiente D medio (promedio) y la confeccionada por interpolación. Fuente: Ramsden, 2015, p. 104.	144
Figura 64. Gráficas polares de las curvas de la Figura 63. Fuente Ramsden, 2015, p. 104.	144
Figura 65. Curvas de desvíos del petrolero MONTE TOLEDO, según los datos de su tablilla de desvíos y según el ajuste de dichos datos por mínimos cuadrados. Fuente: <i>Polish Maritime Research</i> , No 3/2014, p. 26.....	148
Figura 66. Curvas de desvíos del petrolero MONTE TOLEDO: Azul, en el lugar de la compensación (27°N 091°W); Roja, en 60°S 120°E. Fuente: <i>Polish Maritime Research</i> , No 3/2014, p. 28. (izda.)....	148
Figura 67. Curvas de desvíos del petrolero MONTE TOLEDO: Azul, en el lugar de la compensación (27°N 091°W); Roja, en 40°N 000°E. Fuente: <i>Polish Maritime Research</i> , No 3/2014, p. 29. (dcha.) ..	148
Figura 68. Curvas de desvíos del petrolero MONTE TOLEDO: Azul, en el lugar de la compensación (27°N 091°W); Roja, en 0° 030°W. Fuente: <i>Polish Maritime Research</i> , No 3/2014, p. 29. (izda.).....	149
Figura 69. Curvas de desvíos del petrolero MONTE TOLEDO: Azul, en el lugar de la compensación (27°N 091°W); Roja, en 40°S 120°E. Fuente: <i>Polish Maritime Research</i> , No 3/2014, p. 29. (dcha.)...	149
Figura 70. Compás magnético virtual en 3D: operación de eliminar la burbuja, rellenando el mortero con el líquido adecuado. Fuente: <i>2015 International Conference on Virtual Reality and Visualization</i> , p. 315.....	150
Figura 71. Tipos de rumbos y triángulo de velocidades. Fuente: Propia.	155
Figura 72. Buque ATO, visto desde su popa. Fuente: Propia. (izda.)	162
Figura 73. Buque ATO, visto desde su costado de estribor. Fuente: Propia. (dcha.).....	162
Figura 74. Compás magnético del buque ATO en el momento de ajustar el sensor del CMI. Fuente: Propia. (izda.)	163
Figura 75. Compás magnético del buque ATO con el sensor del CMI ajustado. Fuente: Propia. (dcha.)	163
Figura 76. CMI (en modo <i>Compass</i>) con las indicaciones de: rumbo de aguja (C); rumbo verdadero (G), tomado del compás satelital; situación, y declinación magnética. Fuente: Propia.....	163
Figura 77. Calculador de la NOAA: declinación magnética para la situación y el día de las pruebas. Fuente: https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml	164
Figura 78. Bahía de Santoña. Fuente: Google Maps. (izda.).....	164
Figura 79. Puerto de Santoña. Fuente: Google Maps. (dcha.).....	164
Figura 80. Navegador GPS del buque ATO. Fuente: Propia. (izda.)	165
Figura 81. Cabina del buque ATO. Fuente: Propia. (dcha.).....	165
Figura 82. Desvíos obtenidos por el CMI después de efectuar el borneo. Fuente: Propia.	165
Figura 83. Lectura de los rumbos efectivos, comparando el rumbo verdadero indicado por el CMI y el COG dado por el GPS. Fuente: Propia.....	167
Figura 84. Lectura de los rumbos efectivos, comparando el rumbo verdadero indicado por el CMI y el COG dado por el GPS: detalle de la lectura del COG al rumbo verdadero N. Fuente: Propia.	167
Figura 85. Desvíos causados por las varillas +d, +b. Fuente: Propia.....	171
Figura 86. Efecto conjunto de una varilla +d y otra +b, tales que $b = d$. Fuente: Propia.	171

Figura 87. Efecto conjunto de una varilla +d y otra -b, tales que $b = -d$. Fuente: Propia.	172
Figura 88. Efecto conjunto de una varilla +d y otra +b, tales que $d > b$. Fuente: Propia.	172
Figura 89. Ejemplo de curva de los desvíos residuales tras una compensación reducida. Fuente: Propia.	173
Figura 90. Curva de los desvíos residuales (resolución del Ejercicio 45). Fuente: Propia.	176
Figura 91. Curva de los desvíos residuales correspondiente a la Tabla 17. Fuente: Propia.	189
Figura 92. Gráficas cartesianas de los desvíos residuales del buque HÖEGH JACKSONVILLE, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Ramsden, 2015, p. 85.	196
Figura 93. Gráficas polares de los desvíos residuales del buque HÖEGH JACKSONVILLE, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Ramsden, 2015, p. 85.	196
Figura 94. Gráficas cartesianas de los desvíos residuales del buque ALLURE OF THE SEAS, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Ramsden, 2015, p. 104. (corresponde a la Figura 63).....	196
Figura 95. Gráficas polares de los desvíos residuales del buque ALLURE OF THE SEAS, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Ramsden, 2015, p. 104. (corresponde a la Figura 64).....	196
Figura 96. Desvíos residuales del yate TALITHA, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.	197
Figura 97. Desvíos residuales del yate MAILYN IV, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.	198
Figura 98. Fotografía del CMI instalado a bordo del buque ORTZE, en el que figuran los desvíos obtenidos y los coeficientes A,...E. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 116.	199
Figura 99. Desvíos obtenidos (corresponde a la Figura 63). Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 116.	199
Figura 100. Coeficientes A,...E. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 117.	199
Figura 101. Desvíos de la aguja que se instaló en el buque ORTZE, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.	200
Figura 102. Desvíos de la aguja que se instaló en el buque VILLA DE PORTUGALETE, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.	200
Figura 103. Desvíos residuales del buque MUNDO MARINO ECO, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.	201
Figura 104. Desvíos residuales del buque FLY BLUE QUATTRO, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.	202
Figura 105. Desvíos residuales del buque FERRY AMAZONAS II, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.	203
Figura 106. Desvíos residuales del buque HÖEGH JACSONVILLE, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.	207
Figura 107. Desvíos residuales del buque ALLURE OF THE SEAS, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.	207
Figura 108. Desvíos residuales del buque TALITHA, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia. .	207
Figura 109. Desvíos residuales del buque MAILYN IV, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia. .	207

Figura 110. Desvíos residuales del buque MUNDO MARINO ECO, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.	208
Figura 111. Desvíos residuales del buque FLY BLUE QUATTRO, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.	208
Figura 112. Desvíos residuales del buque FERRY AMAZONAS II, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.	208
Figura 113. Desvíos residuales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.	228
Figura 114. Desvíos residuales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.....	230
Figura 115. Desvíos residuales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.	230
Figura 116. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	231
Figura 117. Desvíos residuales del CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.	232
Figura 118. Desvíos residuales del CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.....	232
Figura 119. Desvíos residuales del CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.	233
Figura 120. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	233
Figura 121. Desvíos residuales del CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.	234
Figura 122. Desvíos residuales del CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.....	235
Figura 123. Desvíos residuales del CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.	236
Figura 124. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	236
Figura 125. Desvíos residuales del buque HÖEGH JACKSONVILLE, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.	237
Figura 126. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque HÖEGH JACKSONVILLE, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	237

Figura 127. Desvíos residuales del buque ALLURE OF THE SEAS, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.	238
Figura 128. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque ALLURE OF THE SEAS, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	238
Figura 129. Desvíos residuales del buque TALITHA, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.	240
Figura 130. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque TALITHA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	240
Figura 131. Desvíos residuales del buque MAILYN IV, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.	241
Figura 132. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque MAILYN IV, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	241
Figura 133. Desvíos residuales del buque MUNDO MARINO ECO, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.	242
Figura 134. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque MUNDO MARINO ECO, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	242
Figura 135. Desvíos residuales del buque FLY BLUE QUATTRO, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.	243
Figura 136. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque FLY BLUE QUATTRO, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	243
Figura 137. Desvíos residuales del buque FERRY AMAZONAS II, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.	244
Figura 138. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque FERRY AMAZONAS II según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	244
Figura 139. Diagrama: Distancias mínimas convenientes desde el compás magistral. Fuente: Propia.	. IX
Figura 140. Modelo español de Certificado de compensación de agujas náuticas. Fuente: «BOE» 8 enero 1993.	XIV
Figura 141. Sensor (fluxgate) para ser acoplado a un compás magnético. Fuente: https://marine-data.co.uk/product/magnetic-compass-sensor/ (izda.).	XVII
Figura 142. Esquema del conjunto de dispositivos que configuran el dispositivo transmisor del rumbo magnético. Fuente: <i>Ibidem</i> .	XVII
Figura 143. Procesador del sensor del compás. Fuente: <i>Ibidem</i> .	XVII
Figura 144. Dispositivo que permite introducir manualmente la dm y los coeficientes del desvío. Fuente: <i>Ibidem</i> .	XVII
Figura 145: Compás electromagnético. Fuente: <i>Ibidem</i> .	XVIII

Lista de Tablas

Tabla 1. Equivalencias entre las unidades del sistema CGS y del SI. Fuente: Propia.....	29
Tabla 2. Suma de las expresiones de F_n a los ocho rumbos magnéticos principales. Fuente: Propia....	48
Tabla 3. Dobles de los rumbos de aguja (resolución del Ejercicio 1). Fuente: Propia.....	63
Tabla 4. Múltiplos de los ocho rumbos principales. Fuente: Propia.	65
Tabla 5. Hoja de cálculo (resolución del Ejercicio 8). Fuente: Propia.....	69
Tabla 6. Coeficiente D que anulan las esferas según su diámetro y su distancia al centro de la rosa. Fuente: T.N. Tabla XLVII, p. 302.....	82
Tabla 7. Longitud de barra Flinders necesaria según la varilla c que debe anular. Fuente: T.N. Tabla XLVII, p. 302.....	104
Tabla 8. Máximo error cometido en los coeficientes D, E según la relación V_m/I_{hc} . Fuente: Propia. ...	159
Tabla 9. Determinación de los pseudodesvíos con los datos obtenidos. Fuente: Propia.....	168
Tabla 10. Diferencias entre los coeficientes A, D, E obtenidos mediante los desvíos y mediante los pseudodesvíos. Fuente: Propia.	168
Tabla 11. Diferencias entre los coeficientes B, C obtenidos mediante los desvíos y mediante el método propuesto. Fuente: Propia.....	169
Tabla 12. Hoja de cálculo (resolución del Ejercicio 45). Fuente: Propia.....	175
Tabla 13. Determinación de los rumbos magnéticos y de los desvíos cardinales (resolución del Ejercicio 46). Fuente Propia.	183
Tabla 14. Hoja de cálculo completa (resolución del Ejercicio 46). Fuente: Propia.	183
Tabla 15. Hoja de cálculo para determinar los coeficientes mediante la regla de Cramer. Fuente: Propia.	187
Tabla 16. Tablilla de los desvíos residuales, usando la fórmula práctica, con los coeficientes de la Tabla 15. Fuente Propia.....	188
Tabla 17. Tablilla de los desvíos residuales, usando la ecuación exacta, con los coeficientes de la Tabla 15 y los desvíos de la Tabla 16. Fuente: Propia.	188
Tabla 18. Desvíos residuales del buque HÖEGH JACKSONVILLE. Fuente: Propia.....	195
Tabla 19. Desvíos residuales del buque ALLURE OF THE SEAS. Fuente: Propia.....	196
Tabla 20. Desvíos residuales del yate TALITHA. Fuente: Propia.....	197
Tabla 21. Coeficientes A,...,K residuales del yate TALITHA. Fuente: Propia.....	197
Tabla 22. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del yate TALITHA. Fuente: Propia.....	197
Tabla 23. Desvíos residuales del yate MAILYN IV. Fuente: Propia.....	198
Tabla 24. Coeficientes A,...,K residuales del yate MAILYN IV. Fuente: Propia.....	198
Tabla 25. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del yate MAILYN IV. Fuente: Propia.....	198
Tabla 26. Desvíos de la aguja que se instaló en el buque ORTZE. Fuente: Propia.....	199
Tabla 27. Coeficientes A,...,K de la aguja que se instaló en el buque ORTZE. Fuente: Propia.....	199
Tabla 28. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E de la aguja que se instaló en el buque ORTZE. Fuente: Propia..	199
Tabla 29. Desvíos de la aguja que se instaló en el buque VILLA DE PORTUGALETE. Fuente: Propia.	200
Tabla 30. Coeficientes A,...,K de la aguja que se instaló en el buque VILLA DE PORTUGALETE. Fuente: Propia.....	200

Tabla 31. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E de la aguja que se instaló en el buque VILLA DE PORTUGALETE. Fuente: Propia.	200
Tabla 32. Desvíos residuales del buque MUNDO MARINO ECO. Fuente: Propia.	201
Tabla 33. Coeficientes A,...,K residuales del buque MUNDO MARINO ECO. Fuente: Propia.	201
Tabla 34. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del buque MUNDO MARINO ECO. Fuente: Propia.	201
Tabla 35. Desvíos residuales del buque FLY BLUE QUATTRO. Fuente: Propia.	201
Tabla 36. Coeficientes A,...,K residuales del buque FLY BLUE QUATTRO. Fuente: Propia.	202
Tabla 37. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del buque FLY BLUE QUATTRO. Fuente: Propia.	202
Tabla 38. Desvíos residuales del buque FERRY AMAZONAS II. Fuente: Propia.	202
Tabla 39. Coeficientes A,...,K residuales del buque FERRY AMAZONAS II. Fuente: Propia.	202
Tabla 40. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del buque FERRY AMAZONAS II. Fuente: Propia.	202
Tabla 41. Valores del coeficiente D según los desvíos a los rumbos cuadrantales opuestos que se consideren, y sus diferencias con el coeficiente D medio. Fuente: Propia.	211
Tabla 42. Valores del coeficiente D según el desvío cuadrantal que se considere, y sus diferencias con el coeficiente D medio. Fuente: Propia.	212
Tabla 43. Valores de los coeficientes B, C y D en función del coeficiente A y de los rumbos cardinales que se sigan, cuando se obvia el coeficiente E. Fuente: Propia.	223
Tabla 44. Valores de los coeficientes B, C y D en función del coeficiente E y de los rumbos cardinales que se sigan, cuando se obvia el coeficiente A. Fuente: Propia.	226
Tabla 45. Desvíos residuales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Gaztelu-Iturri, 1999, p. 113.	228
Tabla 46. Coeficientes A,...,K residuales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.	228
Tabla 47. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.	228
Tabla 48. Desvíos residuales a los rumbos principales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	229
Tabla 49. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	230
Tabla 50. Desvíos residuales del CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Gaztelu-Iturri, 1999, p. 116.	231
Tabla 51. Coeficientes A,...,K residuales del CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.	231
Tabla 52. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.	231
Tabla 53. Coeficientes residuales según el método propuesto en el CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.	232
Tabla 54. Desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	233
Tabla 55. Desvíos residuales del CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Gaztelu-Iturri, 1999, p. 117.	234

Tabla 56. Coeficientes A,...,K residuales del CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.	234
Tabla 57. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.	234
Tabla 58. Coeficientes residuales según el método propuesto en el CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.....	235
Tabla 59. Desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.	235
Tabla 60. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque HÖEGH JACKSONVILLE, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.....	237
Tabla 61. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque ALLURE OF THE SEAS, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.....	238
Tabla 62. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque TALITHA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.....	239
Tabla 63. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque MAILYN IV, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.....	240
Tabla 64. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque MUNDO MARINO ECO, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.....	241
Tabla 65. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque FLY BLUE QUATTRO, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.....	243
Tabla 66. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque FERRY AMAZONAS II, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.....	244

Bibliografía

LISTADO DE PUBLICACIONES

- [01] Arribalzaga Aurre, J. (2016). *Sistema de compensación simplificado del desvío semicircular para bitácora con compás de clase “A”* (Tesis Doctoral). Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación, Máquinas y Construcciones Navales. Universidad del País Vasco
- [02] Arribalzaga Aurre, J. et al. (2014). Simplified system for magnetic compass compensation. *6th Interational Conference on Maritime Transport*, pp. 38–49
- [02 bis] Barber: *vide* [48]
- [03] Basterretxea Iribar, I. et al. (2014). Latitude error in compass deviation: mathematical method to determine the latitude error in magnetic compass deviation. *Polish Maritime Research*, No 3/2014, Vol. 21, pp. 25–31
- [04] Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). *Mise en pratique for the definition of the ampere and other units in the International System of Units* [version 1.0: 08/12/2017]; *Mise en pratique for the definition of the kilogram* [version 11.1: 03/05/2018]; *Mise en pratique for the definition of the mole* [CCQM/16-04]; *Mise en pratique for the definition of the kelvin* [CCQM/17-60]
- [05] Centro Nacional de Formación Ocupacional Marítima de Bamio–Villagarcía (2010). *Curso de compensadores de agujas náuticas*. Minsiterio. Bamio: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales–Instituto Social de la Marina; Fondo Social Europeo
- [06 a] Chulliat, A. et al. (2020). *The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025 (WMM 2020-2025): Technical Report*. National Centers for Environmental Information, NOAA. DOI 10.25923/ytk1-yx35
- [06 b] Chulliat, A. et al. (2015). *The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020 (WMM 2015-2020): Technical Report*. National Geophysical Data Center, NOAA. DOI 10.7289/V5TB14V7
- [07] Gaztelu-Iturri Leicea, R. (1999). *Compensación de la aguja náutica: curso de compensador*. Vitoria: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. ISBN 8445715070
- [08] Gea Vázquez, P. (2003). *Compensación del magnetismo accidental del desvío de escora mediante una tercera esfera; su influencia sobre el desvío cuadrantal* (Tesis Doctoral) Departamento de Energía y Propulsión Marina. Universidad de Coruña
- [09] Guerra Piqué, C. (2020). *Análisis de la incidencia de los desvíos sextantal y octantal en el comportamiento de la aguja náutica*. (TFG). Facultad de Náutica de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Disponible en UPCommons

- [10] Graíño, F. et al. (1980). *Colección de tablas náuticas redactadas de Orden de la Superioridad (Tablas Náuticas)*. Edición estereotipada. San Fernando (Cádiz): La Voz. Tabla XLVII (p. 302), pp. 34–35 de la Explicación y uso de las tablas. ISBN 8430021949
- [11] Gurney, A. (2005). *Compass: a story of exploration and innovation*. Revised edition. W. W. Norton & Co. Appendix: Deviation. ISBN 9780393327137
- [12] IMO (2000). *Código internacional de seguridad para naves de gran velocidad, enmendado (Código NGV)*, capítulo 13: *Sistema y equipo náutico de a bordo y registradores de datos de la travesía*, apartado 2: *Compases*
- [13] IMO (2014). *Código internacional para los buques que operan en aguas polares (Código Polar)*, apartados 9.2.2.2, 9.3.2.2
- [14] IMO. *Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar, 1974, enmendado (SOLAS)*, regla V/19: *Prescripciones relativas a los sistemas y aparatos náuticos que se han de llevar a bordo*, apartados 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.2.1, 2.3.5, 2.5.1
- [15] IMO (2010). *Convenio internacional sobre normas de formación, titulación y guardia para gente de mar, 1978, modificado por sus enmiendas sustanciales de 1995 y de 2010 (enmiendas de Manila) (STCW 95/2010): Código de Formación*, parte A, tabla A-II/1
- [16] IMO (2014). *Master and chief mate: model course 7.01*. 2014 Edition. Parts C, D, paragraphs 1.3.1.1: *The parts of the magnetic compass and their function (3h)*; 1.3.1.2: *The errors of the magnetic compass and their correction (27h)*. ISBN 9789280115819
- [17] IMO (1977). *Resolución A.382(X): Compases magnéticos: emplazamiento a bordo y normas de rendimiento*
- [18] IMO (1991). *Resolución A.694(17): Prescripciones generales relativas a las ayudas náuticas electrónicas y al equipo radioeléctrico de a bordo destinado a formar parte del Sistema Mundial de Socorro y Seguridad Marítima (SMSSM)*
- [19] IMO (2000). *Resolución MSC.116(73): Normas de funcionamiento de los dispositivos transmisores del rumbo (DTR) marinos*
- [20] IMO (2004). *Resolución MSC.166(78): Aplicación de las normas de funcionamiento de los dispositivos transmisores del rumbo (DTR) a los dispositivos transmisores del rumbo magnético (DTRM) de uso marítimo*
- [21] IMO (1998). *Resolution MSC.86(70): Adoption of new and amended performance standards for navigational equipment, annex 2: Recommendation on performance standards for marine transmitting magnetic heading devices (TMHDs)*
- [22] ISO. *Standard 25862:2019: Ships and marine technology—Marine magnetic compasses, binnacles and azimuth reading devices*

- [23] Kaplan, W. (1986). *Matemáticas avanzadas para estudiantes de ingeniería*. Edición en español. Wilmington (Delaware, E.U.A.): Addison-Wesley Iberoamericana, S.A. Epígrafes 5.1–5.6 (pp. 236–255), pp. 28, 103–104. ISBN 9688580414
- [24] Lleó, A.; Lleó, L. (2008). *Gran manual de magnitudes físicas y sus unidades: un estudio sistemático de 565 magnitudes físicas*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, pp. 1–68; 347–432. ISBN 9788479787677
- [25] Lushnikov, E.M. (2011). Compensation of magnetic compass deviation at single any course. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav Journal)*, September 2011, Vol. 5, No. 3, pp. 303–307
- [26] Lushnikov, E.M.; Pleskacz, K. (2012). Analysis of problems related to the use of ship's course indicators. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 29 (101). pp. 122–125
- [27] Lushnikov, E.M. (2012). The actual problem of magnetic compass at contemporary navigation. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 32 (104). pp. 103–104
- [28] Lushnikov, E.M. (2012). The reliability of compass information at navigational safety. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 29 (101). pp. 117–121
- [29] Maritime & Coastguard Agency (2007). SOLAS, Annex V/13: *Magnetic compasses*; Annex V/20: *Inspection and survey of navigational equipment*, Section 5: *Magnetic compasses*.
- [30] Martínez-Lozares, A. (2009). *Compás magnético integral para la obtención de desvíos en tiempo real a partir de un sistema global de navegación por satélite (GNSS)* (Tesis Doctoral). Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación, Máquinas y Construcciones Navales. Universidad del País Vasco
- [31] Martínez-Lozares, A. et al. (2011). *La aguja magnética y su compensación: comportamiento de la aguja náutica*. Editorial Académica Española. ISBN-10: 3846565601; ISBN-13: 9783846565605
- [32] Ministerio de Fomento. *Orden FOM/3479/2002, de 27 de diciembre, por la que se regula la firma y visado de documentos a que se refiere el Real Decreto 1837/2000, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de inspección y certificación de buques civiles*. «BOE» núm. 22, de 25 de enero de 2003, pp. 3291–3292 (ref. BOE–A–2003–1586)
- [33] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. *Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre, por el que se establecen las unidades legales de medida*. «BOE» núm. 18, de 21 de enero de 2010, pp. 5607–5619 (ref. BOE–A–2010–927)
- [34] Ministerio de Obras Públicas y Transportes. *Orden ministerial de 14 de diciembre de 1992 sobre compensación de agujas náuticas*. «BOE» núm. 7, de 8 de enero de 1993, pp. 416–418 (ref. BOE–A–1993–457)

- [35] Moncunill Marimón, J. et al. (2020). Compass adjustment with GPS and two leading lines. *8th International Conference on Maritime Transport*, pp. 126–143. Disponible en UPCommons
- [36] Moréu Curbera; Martínez Jiménez (1987). *Astronomía y navegación. Tomo III: curso de capitanes*. 3^a ed. Vigo: los autores. Capítulos LXIX–LXXX (pp. 60–206), pp. 329–330. ISBN 8485645014
- [37] Moyano Sanz, S. (2009). *Apuntes de compensación de agujas náuticas*. Facultad de Náutica de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña
- [38] National Geospatial–Intelligence Agency (2004). *Handbook of magnetic compass adjustment* (Formerly Pub. No. 226). Bethesda (Maryland, E.U.A.)
- [38 bis] NGA: vide [38]
- [39] Patent WO2009027566A1: *Integral magnetic compass for establishing deviation in real time / Compás magnético integral para obtención de desvíos en tiempo real*. Martínez-Lozares, A.–Universidad del País Vasco: 05/03/2009
- [40] Ramsden San Juan, N. (2015). *Análisis de los desvíos de una aguja náutica mediante el estudio de sus valores cuadrantales* (TFM). E.T.S. de Náutica y Máquinas Navales. Universidad del País Vasco
- [41] Sánchez Ramos, E. (1965). *Tablas de logaritmos, trigonométricas y de cálculo de intereses*. 25^a ed. Madrid: Librería y Casa Editorial Hernando, S.A. pp. LXXIV–LXXXIII
- [42] Simón Quintana, J. de (1997). *Patrones de yate*. San Fernando (Cádiz): el autor. pp. 2-6–2-12. ISBN 8492096233
- [43] Smith, A.; Evans, F. J. (1861). On the effect produced on the deviations of the compass by the length and arrangement of the compass-needles; and on a new mode of correcting the quadrantal deviation. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, Vol. 151, pp. 161–181
- [43 bis] T.N. vide [10]
- [43 ter] WMM2020: vide [06 a]
- [44] Wu, J. et al. (2010). 3D interactive simulation of magnetic compass adjustment based on VRML. *Advanced Materials Research*, Vols. 156-157, pp. 211-216
- [45] Yang, X. et al. (2015). Realization of 3D virtual magnetic compass and evaluation system. *2015 International Conference on Virtual Reality and Visualization*, pp. 312–317

WEBGRAFIA

[46] <https://marine-data.co.uk/product/magnetic-compass-sensor> [agosto 2018]

[47] <http://www.bipm.org/en/home> [mayo 2018]

[48] <https://www.professionalmariner.com/swinging-a-compass/> [marzo 2019]

Swinging a compass (26/11/2013). *Professional Mariner*, December-January 2014

[49] www.geomag.bgs.ac.uk/education/poles.html [octubre 2016]

[50] www.geomag.nrcan.gc.ca/index-en.php [Natural Resources Canada, former Geomagnetism Canada] [mayo 2016]

[51] www.ngdc.noaa.gov/geomag/ [Geomagnetism–National Geophysical Data Center] [mayo 2016]

COMENTARIO

La bibliografía se puede clasificar según cuál sea el tipo de texto consultado, y según cuál sea su importancia relativa dentro de la tesis.

Según la tipología, se clasifica en:

I.-Publicaciones: [07], [10], [11], [16], [23], [24], [31], [36], [38], [41], [42].

II.-Estudios académicos (Tesis Doctorales, TFM y TFG): [01], [08], [09], [30], [40].

III.-Artículos: [02], [03], [25], [26], [27], [28], [35], [43], [44], [45], [48].

IV.-Normativa: [04], [12], [13], [14], [15], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [29], [32], [33], [34].

V.-Apuntes; informe; patente: [05], [37]; [06]; [39].

VI.-Páginas web institucionales y de empresa: [46], [47], [49], [50], [51].

Las publicaciones [05] y [37] son los apuntes del curso de compensador del Centro de Formación de Bamio y los apuntes del anterior profesor de la asignatura de Derrotas y compases de la Facultad de Náutica de Barcelona, S. Moyano Sanz, respectivamente. Por la naturaleza de los textos, se trata apuntes; pero dada su extensión y profundidad, es oportuno considerarlos también como publicaciones. Los dos tocan aspectos que no se tratan en el resto de publicaciones consultadas, como por ejemplo, la fórmula para obtener la distancia a la que se deben colocar las esferas correctoras del desvío cuadrantal que se da en los apuntes del profesor Moyano.

Asimismo, según la importancia del texto dentro de la tesis, la bibliografía se clasifica en:

I.-Básica: Consiste fundamentalmente tres libros: el de Martínez-Lozares [31], el curso de capitanes de Moréu Curbera y Martínez Jiménez [36] y el curso de compensador de Gaztelu-Iturri [07]. Los dos primeros describen muy detalladamente toda la teoría de la compensación, tocando aspectos que la mayoría de textos omiten, como es el caso de los tipos de imanes empleados (Martínez-Lozares) o las diferentes aproximaciones de la ecuación del desvío (Moréu); mientras que el tercero desarrolla el temario del curso de compensador, y explica el método de la compensación reducida, desarrollada en la tesis doctoral de su autor. Además, en este bloque, también se considera la normativa básica: la regla V/19 del Convenio SOLAS [14], la Resolución A.382(X) de la OMI [17], la Norma ISO 25862:2019 [22] y la Orden ministerial de 14 de diciembre de 1992 sobre compensación de agujas náuticas [34].

II.-Complementaria del contenido de la bibliografía básica. Este apartado se puede dividir en tres subapartados:

i) Textos muy afines a los tres libros citados en la bibliografía básica, los cuales la complementan, bien sea porque desarrollan con mayor profundidad algunos aspectos, o bien porque tocan otros puntos de interés, como la preparación en [38] de un gráfico con la

variación del azimut del sol a lo largo del intervalo previsto para la compensación. Se trata de los siguientes textos: los apuntes del curso de compensador del Centro de Formación de Bamio [05]; los apuntes del profesor Moyano [37]; la publicación náutica N° 226 de la Armada de los EE.UU. [38]; la información de las Tablas Náuticas [10] referente a la compensación; el Anexo V/13 del Convenio SOLAS [29], y la siguiente webgrafía: [50] y [51], correspondiente a las páginas de geomagnetismo del Gobierno canadiense y de la NOAA respectivamente, por cuanto se explican y se determinan los elementos del campo magnético terrestre, así como el comportamiento errático o inoperativo del compás magnético en las zonas polares.

ii) Estudios académicos, artículos y patente relacionados con la compensación de agujas náuticas: Consiste en tres tesis doctorales [01], [08], [30]; un TFM [40]; un TFG [09], y cuatro artículos [03], [25], [35], [43]. También se incluye en este subapartado, la patente del compás magnético integral [39], diseñado en la tesis del profesor Martínez-Lozares [30], así como otros dos artículos: [48], [02], el primero, sobre un experto en compensación, y el segundo, sobre el dispositivo ideado por el profesor Arribalzaga en su tesis [01]. Todos estos trabajos tienen como objeto de estudio la compensación de agujas náuticas, aunque las aportaciones son independientes unas de otras. En este sentido, citar que los cuatro artículos mencionados son muy diferentes entre sí: [43] es de los investigadores Smith y Evans (s. XIX) sobre la disposición de los imanes en compases magnéticos con sistemas de agujas múltiples, a fin de evitar la aparición de desvíos sextantales (los que dependen del triple del rumbo) considerables; en este artículo, se determinó el modo en cómo se deben disponer los imanes en compases magnéticos con sistemas de agujas múltiples, además de tratar ciertos aspectos de metodología y del desvío sextantal que tienen interés para la presente tesis; [25] es del profesor Lushnikov, quien propone realizar una compensación parcial a un solo rumbo (y solo con imanes) considerando que los coeficientes A, D y E que se obtienen de la tablilla de desvíos existente, permanecen invariantes; [03] es del profesor Basterretxea, quien desarrolla la formulación matemática para actualizar la tablilla de los desvíos residuales cuando un buque cambia de latitud magnética, y además, aplica un método propuesto por el profesor Felski en *Journal of Navigation*, consistente en ajustar por mínimos cuadrados los desvíos residuales obtenidos tras la compensación, a fin de configurar la tablilla de desvíos y obtener un trazado más suave de la curva de desvíos, y [35] es del autor, en el cual se estudia el empleo del GPS en la compensación.

iii) Otras publicaciones, normativa y artículos que no tratan específicamente sobre compensación de agujas náuticas, pero sí tocan ciertos aspectos de interés. Se trata de: el libro de Simón Quintana [42], que hace una descripción muy detallada del compás magnético; la normativa respecto a la formación sobre el compás magnético, sus errores y su compensación

[15], así como el curso modelo de la OMI para capitanes y primeros oficiales [16]; la normativa sobre los dispositivos transmisores del rumbo [12], [19], [20], [21] y la página de una empresa productora de dichos dispositivos [46]; la publicación [11], que explica de manera resumida los resultados del artículo de Smith y Evans; artículos que tratan sobre indicadores de rumbo en general [26], [27], [28], y dos artículos sobre la simulación de un compás magnético en 3D para docencia [44], [45].

III.-Complementaria en cuanto a contenido diferente del de la bibliografía básica. En este apartado, se incluyen las publicaciones que hacen referencia a temas complementarios:

i) Campo magnético terrestre: [06], [49]. La primera corresponde al modelo magnético mundial para periodos de cinco años, y entre otra información, incluye la cartografía magnética de todo el planeta.

ii) Unidades electromagnéticas: [04], [24], [33], [41], [47]. Destacan las publicaciones [24] y [41]. La primera, por abarcar todas las unidades del Sistema Internacional, y la segunda, por explicar de manera muy sintética, didáctica y rigurosa, las unidades electromagnéticas del sistema CGS.

iii) Matemáticas: [23].

iv) Normativa complementaria (excepto la referente a unidades): [13], [18], [32].

Metodología

RECOPIACIÓN Y ORDENACIÓN DE INFORMACIÓN

El objetivo de esta tesis es mejorar la eficiencia en la compensación de agujas náuticas. Por tanto, se trata de un objetivo genérico que debe dar respuesta en diferentes situaciones, pues no se consigue de igual manera en un buque de gran porte, poco maniobrable, pero equipado con compases giroscópico y satelital muy precisos, que en una embarcación menor, muy maniobrable, pero cuyo único indicador de rumbo es el compás magnético. En consecuencia, se requiere un estudio previo de la materia, el cual debe ser: completo, ordenado, sintético y actualizado; con el fin de poder conocer qué aspectos mejorar en cada caso.

Este conocimiento proviene de una extensa bibliografía sobre el fundamento y la técnica de la compensación; pero también de los estudios recientes sobre esta actividad, así como de la normativa en vigor a nivel internacional y nacional.

Analizando la bibliografía, se observa que: por un lado, en varias obras, se tratan los mismos aspectos, siendo por tanto una información repetida con enfoques distintos; mientras que por otro lado, hay temas de interés que solo se tocan en una determinada publicación. Ante todo el volumen de información existente, se ha optado por trazar una línea de exposición propia, la cual se ha pretendido que tenga una dirección suficientemente clara para poder actuar como hilo conductor de la exposición, pero también la flexibilidad necesaria para poder incorporar todos los aspectos puntuales recogidos de diversos textos. Esta línea de exposición se ajusta bastante al índice del curso modelo de la OMI para capitanes y primeros oficiales en lo referente al compás magnético, sus errores y sus correcciones. Asimismo, se ha tomado la decisión de no incorporar ciertos temas, puesto que: si se trata absolutamente toda la información, puede suceder que se pierda el hilo conductor mencionado. En este sentido, por ejemplo, no se ha creído necesario explicar el uso del desviador Thomson.

Por su parte, ha habido una labor importante en la recopilación de toda la normativa existente y en vigor a día de hoy. Las referencias existentes en el Convenio SOLAS a Resoluciones de la OMI y a Normas de la ISO, han sido de gran ayuda para este objetivo, pues dicho Convenio remite a ciertas normas, a la vez que estas hacen referencia a otras. No obstante, se ha tenido que estar pendiente de la actualización de esta normativa, pues aunque se trate de un cuerpo relativamente pequeño y estable dentro del ámbito de la seguridad marítima, los cambios son frecuentes. Como ejemplo, durante el desarrollo de la tesis, se ha publicado una nueva edición de la Norma ISO 25862. Además, en algunos casos, la compilación de normativa ha requerido también un trabajo de traducción, ya que no existen traducciones íntegras al español de todas las normas que son de aplicación a los compases magnéticos.

Por último, se ha realizado un estudio del estado de la técnica, explicando los últimos trabajos que se han desarrollado, algunos de los cuales, como la compensación reducida propuesta por el profesor Gaztelu-Iturri y los análisis de los desvíos cuadrantales realizados por Ramsden y continuados por Guerra, se han aplicado a esta tesis. Dicho estudio ha permitido constatar que son muchas las mejoras que se han planteado para la compensación de agujas náuticas, algunas de las cuales están destinadas a aumentar su eficiencia, como es el caso de la compensación reducida y de un artículo del profesor Lushnikov; pero la mayoría están enfocadas a la eficacia, como es el caso del compás magnético integral (CMI) desarrollado por el profesor Martínez-Lozares, así como los sistemas para compensar los desvíos semicircular y de escora por parte de los profesres Arribalzaga y Gea respectivamente. A pesar de estos avances, no se han interrelacionado estos estudios entre sí y con la presente tesis, a fin de conseguir un sistema global en la mejora de la efectividad de la compensación de agujas náuticas. El motivo de ello es que cada uno de estos trabajos, inculida esta tesis, busca objetivos específicos y no transversales.

Citar también que se ha aprovechado este estudio para exponer un tema poco desarrollado en el ámbito náutico: las magnitudes y unidades electromagnéticas. Tradicionalmente, se han empleado unidades relativas para expresar las fuerzas magnéticas que actúan sobre la aguja (las cuales, de hecho, no son fuerzas, sino intensidades de campo o densidades de flujo magnético). No obstante, los aparatos de medida, la normativa y la cartografía magnética utilizan unidades del Sistema Internacional (SI), cuyo precedente fue el sistema CGS. Este último todavía está en uso en algunos campos del electromagnetismo, y por tanto, conviven unidades de ambos sistemas, además de que, en parte de la bibliografía consultada, se empela el sistema CGS. Asimismo, cuando se cuantifican las *fuerzas* magnéticas, no solo cambia la unidad según el sistema que se utilice, sino también la magnitud (intensidad de campo en el sistema CGS y densidad de flujo en el SI). Por tanto, se han explicado las magnitudes electromagnéticas y sus unidades, así como las equivalencias entre ambos sistemas. Casualmente, en relación a este estudio sobre unidades, durante el desarrollo de la tesis, se han redefinido algunas unidades básicas del SI.

PLANTEAMIENTO DE LOS CASOS DE ESTUDIO Y DE HIPÓTESIS

Una vez realizado un estudio completo de la compensación, juntamente con la experiencia en el desarrollo de esta actividad, y teniendo en cuenta la tecnología actual, se ha detectado la necesidad de formular ciertas preguntas, como:

- ¿Se podrían determinar los coeficientes aproximados del desvío comparando los rumbos de aguja con los efectivos dados por un receptor GPS, considerando el rumbo y la intensidad horaria de la corriente como incógnitas a determinar juntamente con los coeficientes?
- Si se efectúa una compensación en una embarcación que solo dispone de compás magnético, de manera que hay que seguir enfilaciones, las cuales no corresponden exactamente a rumbos magnéticos cardinales o cuadrantales, aunque sean próximas a ellos, ¿qué error se comete al considerar los desvíos tomados en las enfilaciones próximas como los desvíos a los rumbos exactos?
- Teniendo en cuenta que hoy día, el valor del determinante de una matriz se obtiene directamente en una hoja de cálculo, ¿por qué no se considera un sistema lineal de ecuaciones resoluble por el método de Cramer en el caso de seguir enfilaciones?
- ¿La técnica habitual de compensar sigue siendo válida cuando no hay simetría entre los hierros de babor y de estribor del compás, lo que se traduce en varillas d , b considerables, las cuales dan lugar a coeficientes α , ε con valores superiores a los habituales? En relación a esta pregunta, se debe tener en cuenta que la ecuación exacta del desvío depende solo de cinco coeficientes (α , β , γ , δ , ε), pero no es una ecuación lineal. Mediante series de Fourier, se consiguen ecuaciones lineales, relacionando los coeficientes anteriores, llamados exactos, con los coeficientes de la serie de Fourier que se considere, los cuales se denominan coeficientes aproximados. Los coeficientes exactos α , ε suelen tener escaso valor, de manera que la ecuación práctica del desvío es suficientemente precisa si se toma una serie de Fourier con solo los cinco primeros términos: uno que no depende del rumbo (A , desvío constante); dos que dependen del rumbo de aguja ($B \cdot \sin Ra + C \cdot \cos Ra$, desvío semicircular), y dos que dependen del doble del rumbo de aguja ($D \cdot \sin 2Ra + E \cdot \cos 2Ra$, desvío cuadrantal). No obstante, si los coeficientes exactos α , ε tienen valores significativos, se requiere considerar una serie de Fourier con más términos, los cuales, cuando la ecuación práctica es suficientemente precisa, son despreciables. Dichos términos adicionales toman el nombre de desvíos sextantal y octantal, y dependen del triple y del cuádruple del rumbo de aguja respectivamente: $F \cdot \sin 3Ra + G \cdot \cos 3Ra + H \cdot \sin 4Ra + K \cdot \cos 4Ra$.

Con el avance del estudio, se ha puesto de manifiesto que hay varios aspectos que nunca se habían considerado. Estas preguntas y sus consiguientes análisis han dado lugar a los dos primeros casos de estudio. Sin embargo, al abordar el tercer caso, que es la problemática del quinto rumbo (es decir: ¿por qué de los cuatro desvíos a los rumbos cuadrantales, siempre hay uno que da un coeficiente D diferente del que se obtiene con cualquiera de los otros tres?), la respuesta no está únicamente en la teoría, sino que esta se convierte solo en un campo sobre el

cual se puede intuir la causa del fenómeno, pero esta intuición, que es la hipótesis, debe ser corroborada experimentalmente.

Resolver la problemática del quinto rumbo es indispensable para poder compensar y levantar la tablilla de los desvíos residuales con un borneo de solo cinco rumbos (los cuatro cardinales y un cuadrantal), ya que se debe conocer el rumbo cuadrantal cuyo desvío se desajusta, a fin de no arrumbar a él. En el TFM de Ramsden, se constató la problemática del quinto rumbo, observando como las curvas de los desvíos residuales varían según el rumbo cuadrantal que se considere, aunque tres son parecidas y una difiere más con respecto a las otras. Si bien no se hizo un estudio de la causa, Ramsden apunta en sus conclusiones, a que el rumbo cuadrantal cuyo desvío se desajusta podría estar relacionado con el rumbo de grada. En el TFG de Guerra, también se comprobó que la tablilla de los desvíos residuales obtenida mediante la fórmula práctica del desvío no coincide con todos los desvíos a los ocho rumbos principales (es decir: calculando los coeficientes A, B, C, D, E, los desvíos obtenidos mediante la fórmula práctica coinciden con los desvíos observados a los rumbos cardinales, pero no con todos los desvíos observados a los rumbos cuadrantales); no obstante, si se considera la ecuación del desvío que tiene en cuenta los desvíos sextantal y octantal, entonces los valores obtenidos con esta ecuación sí coinciden con los ocho desvíos observados. Vistos estos resultados y el análisis de las diferentes aproximaciones de la ecuación del desvío, se ha planteado la hipótesis de que el rumbo cuadrantal cuyo desvío se desajusta esté relacionado con los desvíos sextantal y octantal.

Teóricamente, se ha demostrado que dicho rumbo depende del desvío sextantal, y de manera específica, de los signos de los coeficientes F y G, los cuales, a su vez, se pueden relacionar con los signos de los coeficientes B y C del desvío semicircular. Por tanto, *a priori*, se puede identificar este rumbo crítico, el cual se ha denominado rumbo erróneo. Concretamente, se identifican dos rumbos cuadrantales opuestos, uno de los cuales es el erróneo, de manera que basta con tomar el desvío a cualquiera de los otros dos rumbos cuadrantales para que la tablilla de desvíos obtenida a partir de los desvíos a los cuatro rumbos cardinales y a un cuadrantal, sea correcta. Finalmente, una vez resuelta la problemática del quinto rumbo, se plantea la posibilidad de reducir el proceso de cinco a cuatro rumbos, dando lugar al cuarto caso de estudio.

VERIFICACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Mediante los datos obtenidos en los compases de nueve buques, se ha verificado el resultado que relaciona el rumbo erróneo con los signos de los coeficientes F y G del desvío sextantal. No obstante, se ha observado que la relación obtenida entre los signos de F y G y los de B y C no se cumple. Por consiguiente, se ha verificado que el rumbo erróneo depende del desvío

sextantal, pero este resultado no se puede aplicar para determinar dicho rumbo tal como se había indicado (determinando dos rumbos cuadrantales opuestos a los cuales no se debe tomar el desvío). Este hecho ha supuesto el replanteamiento de la problemática del quinto rumbo, enfocándolo sobre la base de un error medio (η) y de un error máximo (ξ). Como conclusión teórica, se ha obtenido que el coeficiente D se puede obtener correctamente mediante los desvíos a dos rumbos cuadrantales opuestos, con independencia de que uno de los dos rumbos sea el erróneo; y con los datos de los nueve buques, se ha corroborado este hecho.

El segundo enfoque dado a la problemática del quinto rumbo, si bien ha sido un contratiempo en el tercer caso de estudio (el dedicado a dicha problemática), ha encarrilado de manera directa el cuarto caso (compensación y confección de la tablilla de los desvíos residuales con un solo borneo de cuatro rumbos). Dado que para determinar adecuadamente el coeficiente D, se requiere tomar los desvíos a dos rumbos cuadrantales opuestos, queda claro que la única manera en la que puede ser posible realizar todo el proceso de la compensación con solo cuatro rumbos es la siguiente: tomar los desvíos a dos rumbos cardinales separados 90° y a dos cuadrantales opuestos. La certeza de realizar una compensación correcta del desvío semicircular con solo los datos de dos rumbos cardinales, la da un estudio previo realizado por el profesor Gaztelu-Iturri en su tesis doctoral, y la certeza de realizar una compensación correcta del desvío cuadrantal, la proporciona el tercer caso de estudio de esta tesis.

Además, se ha tenido que obtener una nueva aproximación de la ecuación del desvío con solo cuatro coeficientes. Se han planteado dos sistemas de ecuaciones: uno que obvia el coeficiente A, y otro, el E. Tras el análisis de dichos sistemas, se ha optado por la siguiente aproximación: $\Delta = A + B \cdot \sin Ra + C \cdot \cos Ra + D \cdot \sin 2Ra$, la validez de la cual se ha verificado con los datos de siete buques (de los nueve, los que estaban compensados) y de cuatro casos del estudio del profesor Gaztelu-Iturri.

Asimismo, también ha sido necesaria la verificación del método expuesto para aprovechar la información de rumbo efectivo dada por el GPS, a fin de confeccionar la tablilla de los desvíos residuales en embarcaciones menores, cuyo único indicador de rumbo es el compás magnético, una vez se han compensado los desvíos a dos enfilaciones próximas a rumbos magnéticos cardinales separados 90° . En este caso, a diferencia de la problemática del quinto rumbo y del método para compensar a cuatro rumbos, no se disponía de datos de compensaciones realizadas o de otros estudios. Por tanto, se han tenido que llevar a cabo unas pruebas específicas para verificar el método, las cuales se han realizado a bordo de un buque particular, y haciendo uso del CMI del profesor Martínez-Lozares. Los datos obtenidos en estas pruebas han corroborado el método.

Finalmente, se han extraído las conclusiones del conjunto de la tesis.

INTRODUCCIÓN

El compás magnético tiene la ventaja de que no necesita ningún suministro de energía para su funcionamiento. Por esta razón, es obligatorio a bordo de todos los buques, de acuerdo con la regla V/19 del Convenio SOLAS. No obstante, tiene los siguientes inconvenientes:

- i) No indica el norte verdadero, sino el norte magnético.
- ii) Cerca de los polos magnéticos, queda inoperativo.
- iii) Se ve afectado por los hierros del buque.

Actualmente, con el conocimiento completo del campo magnético terrestre en cualquier punto del planeta, el primer punto deja de ser un inconveniente, e incluso se corrige automáticamente la indicación de rumbo magnético a verdadero (Resolución MSC.116(73) de la OMI).

El segundo inconveniente no se puede resolver, quedando la aguja náutica inoperativa en dos regiones, que a pesar de ser muy reducidas, una de ellas (la ártica) se encuentra en una zona de navegación emergente, con grandes expectativas de explotación y navegación en un futuro próximo. Hay compases magnéticos no mecánicos (dispositivos electrónicos basados en sensores de campo magnético) que mejoran mucho el rendimiento en las áreas próximas a los polos magnéticos¹; pero estos compases dependen de una fuente de alimentación, y por tanto, no cumplen con el requisito de SOLAS V/19.2.1.1.

Finalmente, en cuanto al tercer punto, se requiere que la aguja náutica esté compensada de forma efectiva.

Por consiguiente, toda mejora en el rendimiento del compás magnético pasa por una mejora en la efectividad de la compensación, dado que no se puede actuar sobre el segundo inconveniente, a excepción de la fabricación de compases con muy poco rozamiento, lo que hace que sean aptos para el componente horizontal de la densidad del flujo magnético terrestre de hasta 3 μT (microteslas), en lugar del valor habitual de 6 μT ².

Asimismo, la efectividad de la compensación depende de su eficacia y de su eficiencia. La primera se puede relacionar con la calidad de los dispositivos compensadores, mientras que la segunda, con el tiempo empleado, lo cual afecta a la productividad del buque. En este sentido, para llevar a cabo una compensación rigurosa, se deben seguir varios rumbos, llegando a dar dos vueltas completas al buque. Un objetivo de esta tesis es conseguir un resultado aceptable siguiendo menos rumbos, obteniendo así un ahorro de tiempo (y por tanto de combustible), y reduciendo el tiempo en el que un buque está efectuando cambios de rumbo cerca de tierra y de otros buques.

¹ https://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/compass-en.php

² *Ibidem*

**PARTE I: MAGNETISMO: PRINCIPIOS,
AGUJA NÁUTICA, UNIDADES Y
MAGNETISMO TERRESTRE**

I.1. Magnetismo y aguja náutica

I.1.1. Imanes

Todo imán tiene dos puntos llamados polos. Uno de ellos toma el nombre de polo norte, y el otro, de polo sur. Los polos de igual nombre se repelen, mientras que los de distinto nombre se atraen, y cuanto más cercanos estén, mayor es la atracción o repulsión. Por definición, en una aguja náutica, el polo que se dirige hacia el N geográfico, es también el N magnético, y el que se dirige hacia el S geográfico, el S magnético. En consecuencia, dado otro imán, el polo que repele el N de una aguja, es el N del imán, y el que lo atrae, el S.

A modo de introducción, se exponen las principales características de los imanes (Moréu, 1987, pp. 60–61, 63–64):

Los imanes pueden ser naturales o artificiales. Los primeros son materiales que, en la naturaleza, se presentan como imanes; mientras que los segundos carecen de magnetismo en su estado natural, pero se han transformado en imanes mediante un proceso denominado inducción. El principal imán natural es la magnetita (óxido de hierro (II, III): FeOFe_2O_3), y como ejemplos de inducción, cabe citar: el frotamiento con un imán o la introducción de una barra dentro de un solenoide. Sin embargo, no todos los materiales pueden ser inducidos, sino solo algunos, los cuales reciben el nombre de materiales magnéticos. Asimismo, los imanes artificiales suelen tener pintada de rojo la mitad en la que se encuentra el polo N, y de azul, la que contiene el S, por cuanto los polos N y S también se llaman rojo y azul respectivamente.

Cuando un material magnético ha sido inducido, si se repite el proceso en sentido inverso, se desimanta. Así por ejemplo, si se ha inducido una aguja frotándola con un imán, y se vuelve a frotar en el sentido contrario, irá perdiendo su magnetismo hasta desaparecer. Si el proceso inverso se sigue prolongando, el material quedará imantado de nuevo, pero con el polo N donde antes tenía el S, y el S donde antes estaba el N, lo que se conoce como cambio de polaridad.

El calor también es una causa de desimantación. Si se somete un imán a temperaturas altas, pierde poder magnético, aunque luego lo recobra al enfriarse. Cada material tiene una temperatura a la que pierde todo su magnetismo, la cual se denomina punto de Curie. Los valores de dicha temperatura para algunos materiales magnéticos son: hierro puro, 770 °C; magnetita, 585 °C; cobalto, 1 127 °C; níquel, 354 °C. No obstante, estos valores ponen de manifiesto que el efecto del calor es poco notorio dentro del rango de temperaturas ambientales.

Otra característica de los imanes es la superficialidad; es decir: el estado magnético de un cuerpo se manifiesta en su superficie, lo cual se comprueba si se imanta una barra maciza y un tubo de paredes finas del mismo tamaño, resultando dos imanes igual de potentes.

Asimismo, la capacidad magnética de todo material está limitada. En este sentido, se llama remanencia a la máxima cantidad de magnetismo que puede tener un imán, y se dice que un imán está saturado cuando no es posible imantarlo más. Por su parte, se llama coercitividad a la resistencia que ofrece a la desimantación. La remanencia está en función de la naturaleza del material y de la intensidad magnética de la fuente de inducción. En cambio, la coercitividad solo depende del material.

Destaca del magnetismo, el hecho de que es imposible aislar los polos de un imán. Si se parte un imán, separando las mitades roja y azul, no se obtiene una parte N y otra S, sino dos nuevos imanes menos potentes que el original, y aunque el proceso se vaya repitiendo varias veces, nunca se consigue obtener un N y un S de forma aislada. Este hecho, así como las demás propiedades, se explican mediante la teoría molecular del magnetismo, la cual supone que: en los materiales magnéticos, las moléculas se comportan como pequeños imanes, que normalmente, se encuentran desordenados, sin que se aprecie un estado magnético en conjunto; pero cuando se logra ordenar (total o parcialmente) las moléculas en una misma dirección, los pequeños imanes suman sus efectos, y el cuerpo se convierte en un imán.

I.1.2. Campo magnético

En este epígrafe, se explica de manera descriptiva, el concepto de campo magnético y de ciertas magnitudes relacionadas con él.

A efectos únicamente magnéticos (no electromagnéticos), se define un campo magnético como el espacio bajo la influencia de un imán. Esta influencia se puede describir como la aparición de unas líneas que: salen del polo N del imán, y vuelven a entrar en el imán por su polo S. Toman el nombre de líneas de fuerza del campo magnético, y orientan a otros imanes más pequeños, así como también a trocitos de materiales magnéticos, como es el caso de las limaduras de hierro que se muestran en la Figura 1. Cada línea tiene una determinada forma geométrica, pero todas ellas tienen su parte cóncava en el lado del imán.

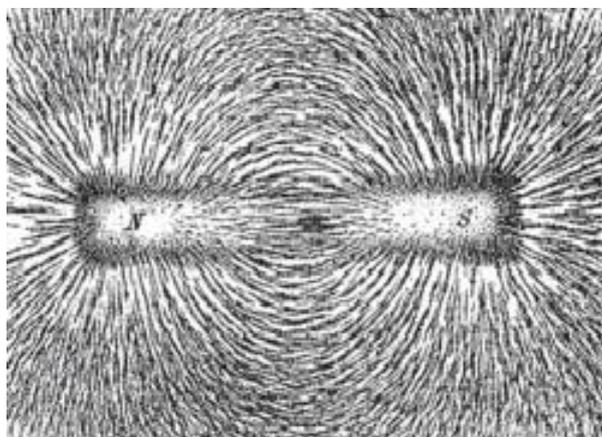


Figura 1. Líneas de fuerza. Fuente:

http://1.bp.blogspot.com/_Sw4A4QAD55I/SviMSz_TPKI/AAAAAAAAAHk/8ZyIU5us8c/s320/Dibujo5.bmp

La longitud de las líneas depende de la longitud del imán, puesto que: como se ha indicado, estas salen del polo N del imán, y entran de nuevo en él por su polo S, recorriendo, cada una de ellas, parte del espacio siguiendo su forma geométrica. Por tanto, cuánto más largo sea el imán, más largas serán las líneas, y también más extenso será el espacio que queda bajo su influencia, del mismo modo que cuánto mayor es el diámetro de un círculo, mayor es el espacio que abarca el círculo (aunque las líneas de fuerza no son circulares).

Los cuerpos hechos de materiales magnéticos, como es el caso de las limaduras de hierro, cuando están dentro de un campo magnético, se inducen, y se comportan como imanes. Este es el motivo por el cual también se orientan según las líneas de fuerza. El proceso de inducción se explica en el epígrafe I.1.3.

El concepto de campo magnético tiene sentido cuando el imán generador del campo es mucho mayor que los demás imanes. Así por ejemplo, una aguja náutica se ve afectada por el campo magnético terrestre y por el de los hierros del buque; pero la aguja no afecta al campo magnético terrestre, ni tan siquiera afecta al magnetismo de los hierros del buque, pues el campo magnético debido a estos hierros es el mismo con o sin la aguja a bordo. En este caso, las líneas de fuerza de la aguja son mucho más cortas que las que generan el campo magnético terrestre y el de los hierros del buque, con lo cual, también la extensión que ocupan es mucho menor. Así pues, a poca distancia de la aguja, ya no hay líneas generadas por ella, y las que llegan más lejos, tal vez ni alcanzan a tocar los hierros del buque. Por el contrario, dos agujas juntas crean dos campos magnéticos iguales o muy parecidos, de forma que las líneas de ambos se modifican entre sí.

El número de líneas de fuerza que salen del polo N de un imán (o las que entran por su polo S) recibe el nombre de masa magnética. Esta magnitud expresa la cantidad de magnetismo que tiene el imán, pues dos imanes del mismo tamaño generan campos magnéticos que, en principio, tienen el mismo alcance; pero el número de líneas que tiene cada campo es diferente. Además, el mayor o menor número de líneas también hace aumentar o disminuir el alcance del campo. Por tanto, la extensión de un campo magnético depende principalmente de la longitud del imán generador, pero también de la masa magnética de sus polos.

Asimismo, se denomina flujo magnético al número de líneas que pasan por un área perpendicular a ellas. En la sección del imán donde se encuentran los polos (aproximadamente a 1/12 de su longitud; Moréu, 1987, p. 172), el flujo coincide con la masa magnética, pero en otras áreas del campo, el flujo siempre es menor que la masa magnética. Mediante el flujo magnético, se relaciona un concepto descriptivo (las líneas de fuerza) con una magnitud física. En el sistema CGS, el flujo y la masa magnética tienen la misma dimensión ($\text{cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$), pero en el Sistema Internacional de Unidades (SI), se expresan en unidades diferentes.

La densidad de las líneas (más juntas o más separadas) en una determinada área del campo, depende de la distancia de dicha área a cada uno de los polos, siendo mayor la densidad cuanto más cerca esté de los polos. Sin embargo, el medio en el que se encuentra el imán, también hace que las líneas estén más juntas o más separadas. En este sentido, se puede decir que el medio *comprime* o *dilata* el campo magnético.

La incidencia del medio queda clara cuando las líneas que ocupan un determinado espacio en el aire o en el vacío, vuelven a entrar en el imán, quedando todas ellas en su interior (realmente, en su superficie, de acuerdo con la superficialidad del magnetismo), y poniendo de manifiesto que la densidad de líneas dentro del imán es muy superior a la del medio exterior.

En la naturaleza, se observan dos tipos de medios: unos, con una densidad de líneas parecida a la del vacío, y otros, con una densidad muy superior. Los primeros son materiales no magnéticos, mientras que los segundos son los magnéticos. A los materiales no magnéticos, cuando interesa destacar su ausencia de magnetismo, también se los llama antimagnéticos o amagnéticos.

Se denomina permeabilidad magnética (μ) a la capacidad de *absorber* o *comprimir* los campos magnéticos. En el vacío, $\mu = 1^3$. Luego, en un medio menos permeable al magnetismo que el vacío, como el agua (un poco menos permeable que el vacío) o el bismuto (mucho menos permeable), μ es menor que 1; mientras que en un medio más permeable, μ es mayor que 1.

Según el valor de μ , los medios y materiales se clasifican en: ferromagnéticos (μ muy superior a 1), paramagnéticos (μ ligeramente superior a 1) y diamagnéticos (μ inferior a 1). Es decir: los materiales o medios magnéticos son los ferromagnéticos, mientras que los no magnéticos pueden ser paramagnéticos o diamagnéticos.

Cabe destacar que los materiales diamagnéticos, ante un campo magnético muy intenso, pueden ser repelidos por el imán generador del campo, dando lugar al fenómeno conocido como levitación diamagnética, en la que: un cuerpo muy diamagnético (por ejemplo el bismuto), al ser repelido por un imán potente, la fuerza magnética supera el peso del cuerpo y este se eleva.

Asimismo, se define la densidad del flujo magnético (B) como el número de líneas que pasan a través un área (A) perpendicular a ellas:

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

Luego, la fuerza que actúa sobre una masa magnética m que se encuentre en el campo (por ejemplo el polo de una aguja náutica) es:

³ Este valor corresponde a la permeabilidad magnética relativa. En el epígrafe I.2.2, se distingue entre la permeabilidad magnética absoluta y la permeabilidad magnética relativa.

$$F = m \cdot B$$

Dicha masa magnética m es atraída por uno de los polos del imán, y repelida por el otro. La expresión anterior indica que una masa con polaridad N (positiva) es *empujada* en el sentido de las líneas de fuerza (hacia el S del imán generador del campo), mientras que una masa con polaridad S (negativa) es *empujada* en el sentido contrario (hacia el N del imán). Debido a la rigidez de todo imán afectado por un campo magnético, las fuerzas que aparecen en sus polos N y S, generan un momento que lo orienta en la dirección de las líneas de fuerza, con el polo N buscando el polo S del imán generador del campo, y viceversa con el polo S.

Además, la fuerza F que aparece sobre dos masas magnéticas m, m' separadas una distancia d , viene dada por la siguiente expresión, análoga a la ley de gravitación universal:

$$F = \mu \cdot \frac{m \cdot m'}{d^2}$$

donde μ es la permeabilidad magnética del medio, que hace que las fuerzas de atracción o repulsión sean más o menos intensas.

Aplicando esta expresión a una masa magnética con polaridad N, situada en un punto del campo (punto n), se obtiene la dirección de las líneas de fuerza alrededor del punto.

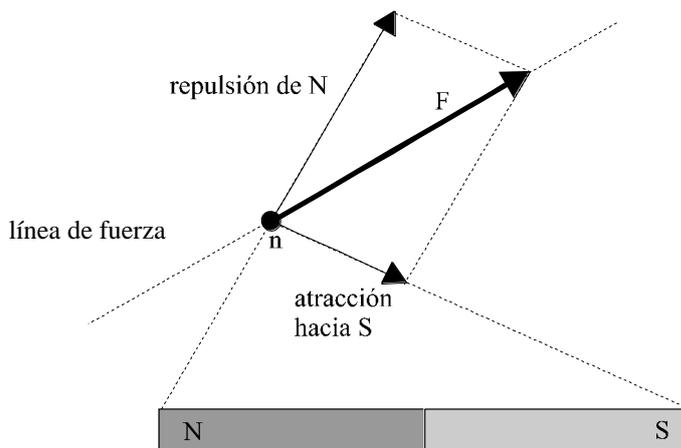


Figura 2. Dirección de las líneas de fuerza alrededor de un punto. Fuente: Propia.

Asimismo, se define la intensidad del campo magnético (H) en un punto como la fuerza por unidad de masa magnética en el vacío, de modo que: siendo m la masa magnética afectada por el campo, la fuerza F viene dada por la siguiente expresión:

$$F = m \cdot \mu \cdot H$$

Por tanto, al ser $F = m \cdot B$, resulta que:

$$B = \mu \cdot H$$

La coercitividad de un imán, que solo depende de su material, es la intensidad de campo magnético que se le debe aplicar para desmagnetarlo (Moréu, 1987, p. 64).

En el sistema CGS, la densidad del flujo magnético (B) y la intensidad del campo (H) tienen la misma dimensión ($\text{cm}^{-1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$), pero en el SI, se expresan en unidades diferentes. Además, en el SI, la permeabilidad magnética es una magnitud, mientras que en el sistema CGS, es un factor adimensional.

I.1.3. Inducción

Cuando las líneas de fuerza de un campo magnético pasan a través de un cuerpo que tiene materiales magnéticos, dicho cuerpo se induce. Esto es lo que sucede cuando las líneas de fuerza del campo magnético terrestre pasan a través de los hierros de un buque.

La inducción crea imanes más o menos intensos según la permeabilidad magnética de cada material, y a la vez, estos imanes pueden ser permanentes o temporales, según la coercitividad del material (Moréu, 1987, pp. 64, 78–79).

Los imanes permanentes, cuando han sido inducidos, mantienen su masa magnética, y sus polos N y S no cambia. Por el contrario, los imanes temporales cambian su masa magnética y su polaridad según la orientación que tengan dentro del campo magnético. En compensación de agujas náuticas, estos últimos toman el nombre de varillas, reservándose la denominación de imanes para los primeros. Independientemente de que se forme un imán o una varilla, la inducción de una barra se produce de la siguiente forma (Moréu, 1987, pp. 62–63):

- i) La masa magnética del imán/varilla resultante es proporcional a la intensidad del campo magnético en el que se encuentra la barra.
- ii) La barra solo puede quedar inducida por una fuerza que actúe en su misma dirección, por cuanto: si forma un ángulo con las líneas de fuerza, la intensidad del campo se descompone en una fuerza longitudinal y en otra transversal respecto a la barra, siendo únicamente la primera la que la induce. Esto implica que: cuanto menor sea el ángulo que forme la barra con las líneas de fuerza, más potente será el imán/varilla, siendo nula la inducción cuando la barra se halle perpendicular a las líneas de fuerza.
- iii) Dentro del campo magnético terrestre, el polo N de la barra se origina cerca del extremo que se encuentra al N geográfico, y el polo S, cerca del extremo que está al S geográfico. Esto se debe a que las líneas de fuerza del campo magnético terrestre se dirigen (geográficamente) de S a N, entrando en la barra por su extremo situado al S geográfico, y saliendo por el que se encuentra al N.

En la Figura 3, se muestra de forma gráfica, la inducción de una barra según su posición respecto al meridiano magnético, el cual corresponde a la dirección del componente horizontal de la intensidad del campo magnético terrestre. La mayor o menor masa magnética de los polos se representa por su tamaño.

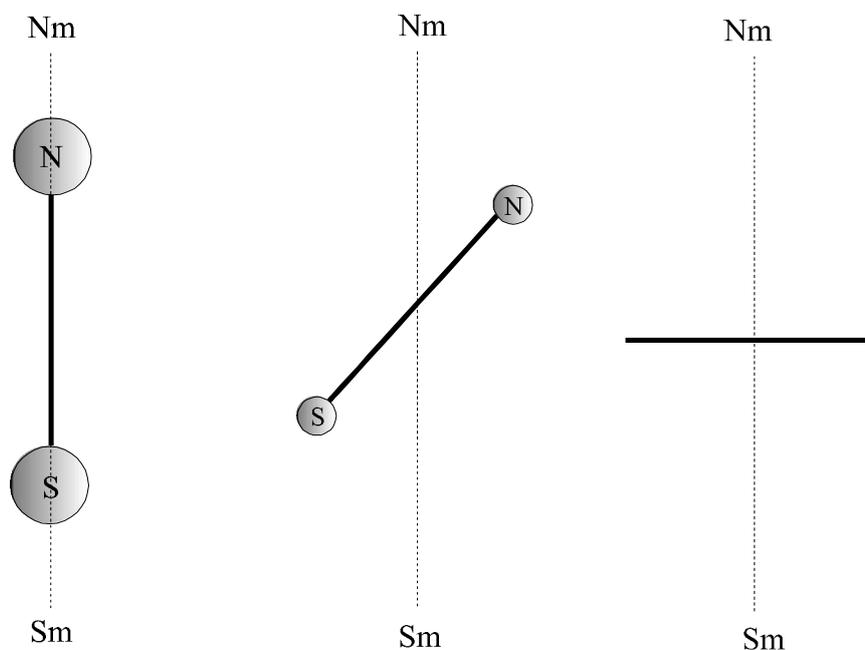


Figura 3. Inducción de una barra por el componente horizontal del campo magnético terrestre. Fuente: Propia.

I.1.4. Clasificación de los hierros

Los aceros usados en la construcción naval se dividen, magnéticamente, en tres grupos (Moréu, 1987, pp. 64, 78–79, 91–92):

i) Hierros duros: son ricos en carbono, y se comportan como imanes. Se inducen lentamente durante el proceso de construcción de un buque, pero el estado magnético que adquieren es muy duradero. Esto es por causa de que tienen una permeabilidad magnética baja, pero una elevada coercitividad. A ellos se debe el magnetismo permanente del buque, el cual va cambiando con el tiempo, aunque de forma lenta.

ii) Hierros dulces: tienen poco o nada de carbono, y se comportan como varillas. A diferencia de los duros, poseen una gran permeabilidad magnética, pero escasa coercitividad. Por tanto, se inducen rápidamente según la condición de intensidad y dirección del campo magnético, pero no mantienen el magnetismo adquirido cuando se altera la condición. Esto se traduce en cambios rápidos del estado de imantación cuando varía el campo magnético o la orientación respecto al mismo. Son los responsables del magnetismo inducido.

iii) Hierros con características intermedias: son hierros de cualidades intermedias entre los duros y los dulces. Cuando el buque mantiene la misma proa durante varios días, estos hierros adquieren un estado magnético que conservan al cambiar el rumbo. Esto no ocurre en los hierros dulces, aunque a diferencia de los duros, esta imantación se pierde rápidamente (entre 2 y 5 días según el caso). El fenómeno se conoce como magnetismo subpermanente, y se ilustra en la Figura 4.

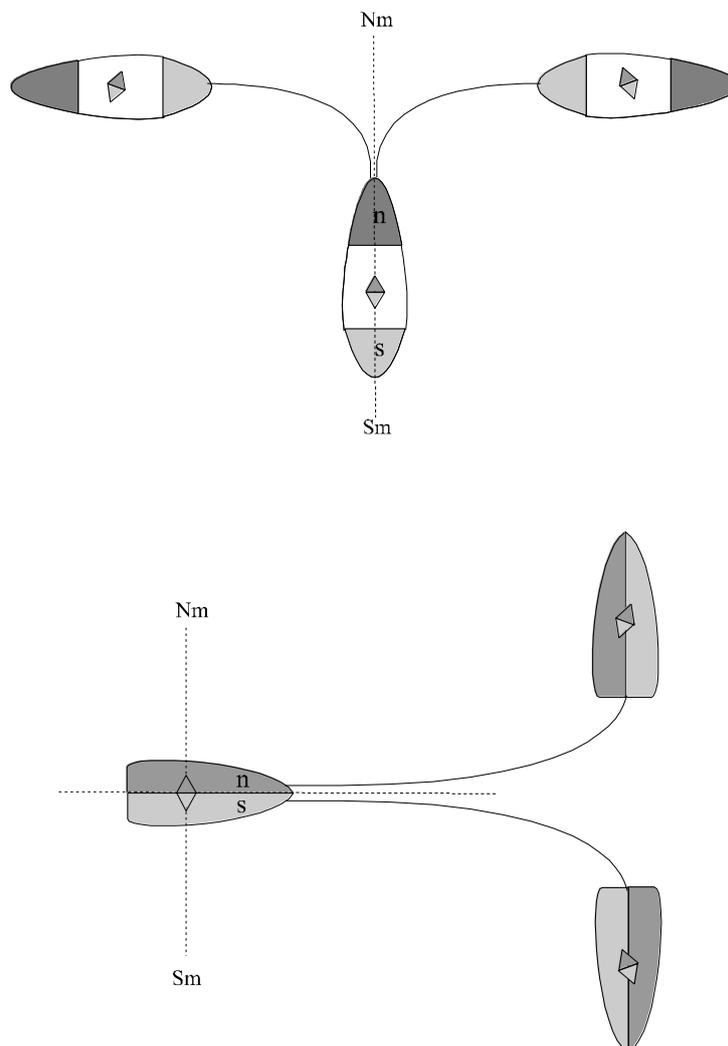


Figura 4. Manifestación del magnetismo subpermanente al cambiar el rumbo. Fuente: Propia.

I.1.5. Aguja náutica

La aguja náutica o magnética es una barrita de acero imantada. Se denomina aguja por su parecido con la aguja de coser, teniendo en cuenta además, que en los antiguos compases, también llevaba ojos, por donde pasaba un hilo que la sujetaba a otras agujas y a la *rosa de los vientos* (Simón, 1997, p. 2-9).

Actualmente, la rosa de los vientos suele denominarse simplemente *rosa* o *rosa náutica*, y consiste en un disco donde están marcados los rumbos de 0° a 360° . Tal como se acaba de apuntar, un compás magnético no consta de una sola aguja, sino de un conjunto de ellas, las cuales están fijas en la rosa. El motivo de un sistema múltiple en lugar de una sola aguja, así como la disposición de las agujas, se explica en el epígrafe I.1.8.

El conjunto de agujas y rosa se encuentra dentro de una caja circular llamada *mortero*, en el centro de la cual, hay un eje vertical sobre el que se apoya la rosa. Dicho eje toma el nombre de *estilo*, y tiene una punta muy dura y afilada, con el objetivo de que el rozamiento entre él y la rosa sea mínimo. La tapa y la base del mortero son de cristal, y el resto, de un material

antimagnético. También lleva unas *líneas de fe*, que deben coincidir con la línea de crujía del buque una vez instalado a bordo. (Simón, 1997, p. 2-10)

El centro de la rosa tiene una hendidura hacia arriba, en forma de cono, llamada *chapel*, siendo su vértice el punto donde la rosa se apoya en el estilo. La función del chapel es doble: en primer lugar, da estabilidad al conjunto de agujas y rosa, ya que su centro de gravedad queda más bajo que su punto de apoyo (Simón, 1997, p. 2-10), y en segundo lugar, ayuda a disminuir el rozamiento entre la rosa y el estilo, gracias a una piedra muy dura que lleva alojada en su vértice, la cual suele ser un zafiro o un rubí (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 41).

Antiguamente, las agujas eran secas, pero hoy día, son líquidas; es decir: dentro del mortero, hay una mezcla de agua destilada con alcohol, utilizándose este para evitar la congelación. En los compases fabricados en Europa o en Japón, la proporción es del 50/50 %, mientras que los construidos en Estados Unidos, en su lugar, tienen un aceite ligero (Barber, 2013)⁴. En ambos casos, la rosa lleva un *flotador* en su parte central, el cual tiene por objetivo disminuir el rozamiento entre el estilo y el chapel, así como aumentar la estabilidad del compás (Gaztelu-Iturri, 1999, pp. 42, 44). El flotador también se aprovecha para alojar las agujas en el interior de unos tubos sujetos a él (Simón, 1997, p. 2-9). La sustitución de las agujas secas por las líquidas fue debida a que: con el aumento de la velocidad de los buques y el uso de motores diésel, las agujas secas sufría trepidaciones que afectaban a su estabilidad (Martínez-Lozares, 2011, p. 58).

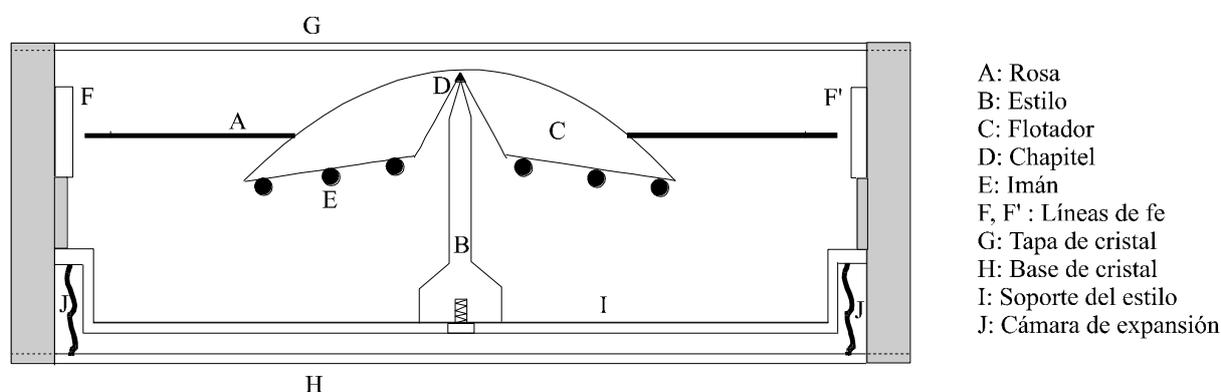


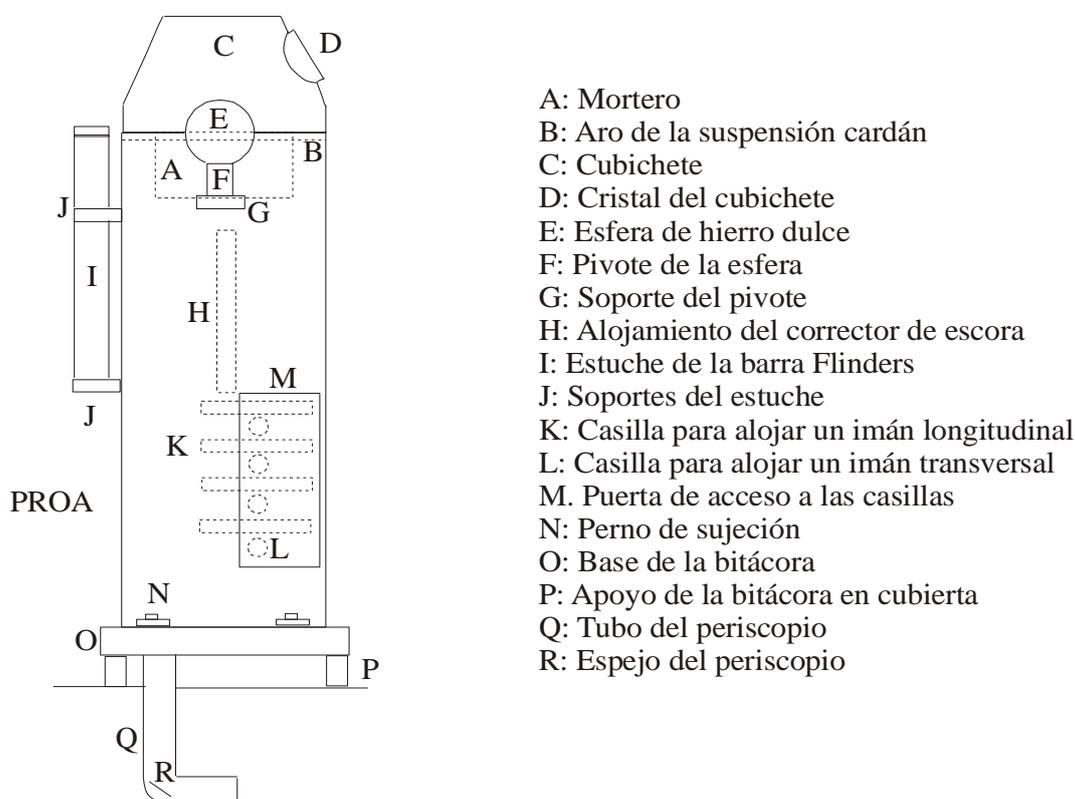
Figura 5. Mortero de una aguja líquida. Fuente: Propia.

El mortero va colocado en la *bitácora*, que es un armario de forma cilíndrica o similar, generalmente fijo en crujía, y hecho de materiales antimagnéticos, como madera, latón o plástico. La bitácora tiene dos funciones: primera, sujetar el mortero, y segunda, alojar en su interior y a su alrededor, los correctores para compensar los desvíos de la aguja. En el interior de la bitácora, se encuentran imanes longitudinales, transversales y verticales, que se usan para compensar el efecto de los hierros duros, y a su alrededor, dos esferas (una a cada lado) y una barra (generalmente a proa del compás), siendo estas de hierro dulce para contrarrestar el

⁴ <https://www.professionalmariner.com/swinging-a-compass/>

efecto de dichos hierros. Los imanes verticales se emplean para corregir los desvíos causados por la escora, de forma que el conjunto de ellos se llama *corrector de escora*, mientras que la barra se denomina *barra Finders*. El acoplamiento del mortero en la bitácora se efectúa mediante una suspensión cardán, que permite que la aguja permanezca horizontal durante los balances y las cabezadas. Finalmente, el mortero queda cubierto por una tapa adaptada a la bitácora, la cual recibe el nombre de *cubichete*. (Simón, 1997, p. 2-10, 2-11)

Dado que la bitácora se encuentra en la cubierta magistral (encima del puente), suele ser habitual la instalación de un periscopio que permita leer el rumbo desde el puesto del timonel en el puente. Para ello, aparte de que la base del mortero sea transparente (de cristal), es preciso que los rumbos en la rosa se puedan leer por las dos caras de la misma. Cuando el timón estaba frente a la bitácora, el cubichete tenía un cristal delantero para que el timonel pudiera ver la rosa, a la vez que el interior quedaba iluminado por unos faroles llamados lantías (Simón, 1997, p. 2-11). Hoy día, la iluminación es eléctrica, y muchos cubichetes no son más que meras tapas semiesféricas. Al lado de la rosa, hay dos bombillas, una de la cuales la ilumina permanentemente, pues lo normal es que siempre esté tapada por el cubichete, y la otra es de respeto, pudiéndose conmutar desde el puente. La bombilla de respeto es de 24 V, y toma su alimentación del equipo de emergencia, lo que garantiza el alumbrado de la rosa en caso de que falle el sistema de alimentación principal.



- A: Mortero
- B: Aro de la suspensión cardán
- C: Cubichete
- D: Cristal del cubichete
- E: Esfera de hierro dulce
- F: Pivote de la esfera
- G: Soporte del pivote
- H: Alojamiento del corrector de escora
- I: Estuche de la barra Flinders
- J: Soportes del estuche
- K: Casilla para alojar un imán longitudinal
- L: Casilla para alojar un imán transversal
- M: Puerta de acceso a las casillas
- N: Perno de sujeción
- O: Base de la bitácora
- P: Apoyo de la bitácora en cubierta
- Q: Tubo del periscopio
- R: Espejo del periscopio

Figura 6. Partes de una bitácora. Fuente: Propia.

I.1.6. Momento director

El momento magnético (M) de una aguja es el producto de la masa magnética (m) de uno de sus polos por la distancia (d) entre ambos: $M = m \cdot d$. En los compases con más de una aguja, es la suma de los momentos de cada una de ellas. Como magnitud vectorial, la dirección corresponde a la línea recta que une los polos magnéticos del imán, y el sentido, al que va del polo S al N. El sentido es de S a N debido a que las líneas de fuerza salen del polo N y entran por el S, de modo que, dentro del imán, se dirigen del polo S al N. (Moréu, 1987, p. 65)

Siendo H el componente horizontal de la densidad del flujo magnético terrestre, en el polo N de la aguja, actúa la fuerza $m \cdot H$, y en el S, la $-m \cdot H$. Si la aguja no está compensada, la resultante de los campos magnéticos que afectan a la aguja (el terrestre y el de los hierros del buque) tiene otro componente horizontal (H'), cuyo ángulo con la dirección de H es el desvío de la aguja. En este caso, las fuerzas en los polos N y S de la aguja son: $m \cdot H'$ y $-m \cdot H'$.

Cuando la aguja se separa un ángulo α de su posición de equilibrio (dirección de H o H'), las fuerzas $m \cdot H$, $-m \cdot H$ (o las $m \cdot H'$, $-m \cdot H'$) crean un momento director o giratorio (G), cuya expresión, de acuerdo con la Figura 7, es:

$$G = m \cdot H \cdot \chi = m \cdot H \cdot d \cdot \sin \alpha = M \cdot H \cdot \sin \alpha$$

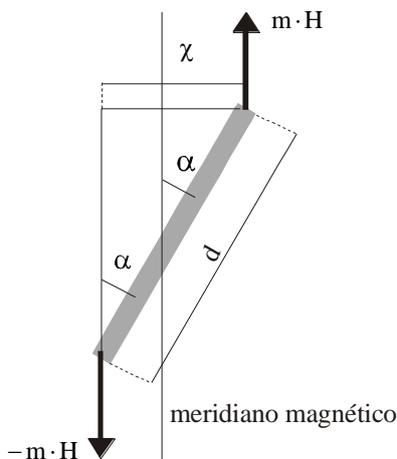


Figura 7. Fuerzas causantes del momento director. Fuente: Propia.

Para H' , la expresión es análoga.

Cuando la aguja se acerca al meridiano magnético, disminuye el ángulo α , y por tanto, también disminuye el momento director, hasta que este se iguala con el momento resistente (R), y se llega a una nueva situación de equilibrio con un ángulo β :

$$G = R \Rightarrow M \cdot H \cdot \sin \beta = R \Rightarrow \sin \beta = \frac{R}{M \cdot H}$$

La sensibilidad de una aguja es la capacidad que tiene para acusar los cambios de rumbo. Cuanto más sensible sea, acusará cambios de rumbo más pequeños. Una aguja náutica se considera suficientemente sensible si el ángulo β no es superior a un cuarto de grado. Para que

β sea mínimo, conviene que la resistencia sea pequeña y el momento magnético grande. Lo primero se logra empleando chapiteles duros, así como estilos de punta dura y afilada, y lo segundo, con sistemas de agujas múltiples. (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 44)

La sensibilidad de una aguja se puede comprobar determinando el ángulo β . Para ello, se separa con un imán el N de la aguja unos pocos grados (por ejemplo 5°). Después de retirar el imán, se espera que la aguja quede en reposo, y se compara el rumbo leído con el que marcaba antes, siendo β la diferencia. Luego, se repite el procedimiento, separando el N de la aguja los mismos grados hacia el otro lado, y se hace un promedio de los dos valores de β obtenidos. Como ya se ha indicado, β debe ser a lo sumo un cuarto de grado; esto es: 0° a cada banda, o 0° a una banda y $0,5^\circ$ a la otra, considerando que difícilmente se pueden apreciar variaciones menores de medio grado. (Gaztelu-Iturri, 1999, pp. 44–45)

La sensibilidad es una de las dos propiedades de toda aguja náutica, siendo la otra la estabilidad, que está relacionada con el periodo de oscilación de la aguja, así como la sensibilidad lo está con el momento director.

I.1.7. Periodo de oscilación

La situación de equilibrio $G = R$ se logra después de que la aguja dé una serie de oscilaciones, como si se tratara de un péndulo (Moréu, 1987, p. 69). Por tanto, el periodo de estas oscilaciones es análogo al de un péndulo compuesto. Siendo I el momento de inercia de la aguja y F la fuerza que actúa sobre uno de sus polos, el periodo (T) es:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{I}{F \cdot d}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{I}{m \cdot H \cdot d}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{I}{M \cdot H}}$$

La estabilidad de una aguja es la propiedad que tiene para seguir marcando el mismo rumbo a pesar de los movimientos del buque. Para ello, es conveniente que el periodo de oscilación sea grande, dándose la peor condición cuando existe sincronismo con el periodo de balance del buque. Teniendo en cuenta que el periodo doble de balance suele ser de 8 a 10 s, los fabricantes de agujas hacen que su periodo doble de oscilación sea de unos 20 s. (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 44)

Para que el periodo de oscilación sea grande, y cosecuentemente, la aguja disponga de una buena estabilidad, conviene que el momento de inercia sea grande y el momento magnético pequeño. Pero esto último no interesa, pues va en detrimento de la sensibilidad, por cuanto lo que se hace es aumentar la relación entre I y M , incrementando el primero. En las agujas secas, se fabricaba la rosa con un ligero aro de aluminio en su periferia, llamado aro de inercia, el cual, al estar alejado del eje de rotación (el centro de la rosa), hacía aumentar I , ya que $I = \sum_k m_k \cdot d_k^2$, siendo m_k , d_k las masas parciales y sus respectivas distancias al eje. En las

agujas líquidas, el momento de inercia lo aumenta el flotador, al estar también su masa alejada del centro. (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 44)

En una aguja líquida, es difícil determinar su periodo, debido a que el rozamiento entre la rosa y el líquido hace que las oscilaciones sean aperiódicas. No obstante, se puede tener una aproximación. Para ello, se separa con un imán el N de la aguja de manera notoria (por ejemplo unos 35° o 40°), retirando el imán una vez conseguido este desvío. Cuando el rumbo pasa por la línea de fe, se pone en marcha el cronómetro, y se para cuando vuelve a pasar por ella. De esta forma, se obtiene el periodo simple o semiperiodo de oscilación. Luego, se repite la operación varias veces, y se toma el valor promedio de los diferentes datos obtenidos. (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 45)

Sea T el periodo de oscilación de la aguja en tierra, en un lugar libre de perturbaciones magnéticas, y sea T' su periodo a bordo, en un lugar de igual H y a un determinado rumbo magnético, cuya fuerza orientadora es H'. Luego,

$$\frac{T^2}{T'^2} = \frac{4\pi^2 \cdot \frac{I}{M \cdot H}}{4\pi^2 \cdot \frac{I}{M \cdot H'}} = \frac{H'}{H}$$

Esta igualdad se aplica para obtener la relación entre: la fuerza orientadora en el emplazamiento del compás (H'), y la que habría en dicho emplazamiento si no hubiera perturbaciones magnéticas debidas a los hierros del buque (H). Para ello, hay que conocer los periodos T, T', y puesto que las actuales agujas líquidas son aperiódicas, para obtener la relación entre H y H' de forma precisa, se emplea una aguja oscilante especial, que se sustituye por la del buque. Así pues, se evalúa el periodo de la aguja oscilante en tierra y a bordo (a los distintos rumbos), para lo cual, se suelen cronometrar diez oscilaciones, de modo que cada periodo se expresa por la duración de estas oscilaciones. (Moréu, 1987, pp. 150 –151)

I.1.8. Sistema de agujas múltiples

Durante siglos, se usaron agujas largas (hasta 15 pulgadas), puesto que se creía que tenían una mayor fuerza magnética (lo cual es cierto: *vide* epígrafe I.1.6) y una mejor estabilidad con mala mar (lo cual no es cierto: *vide* epígrafe I.1.7). Pero estas agujas, aparte de que empeoran la estabilidad, hacen que los desvíos sextantal y octantal (explicados en el epígrafe II.2.3 y en el capítulo II.3) adquieran valores considerables, cuando lo habitual es que sean despreciables. La interacción de los imanes correctores con las agujas largas, genera valores notables del desvío sextantal; mientras que la interacción de los correctores de hierro dulce con dichas agujas, incide en el desvío octantal.

Archibald Smith (Glasgow, 1813–Londres, 1872), conocido por haber formulado la ecuación del desvío, desarrolló la siguiente regla para la disposición de agujas múltiples en una rosa: cuando hay dos agujas, se deben colocar de forma que la línea que unes sus extremos con el centro de la rosa, forme un ángulo de 30° con la línea N–S, y cuando hay cuatro agujas, que dichos ángulos sean de 15° y 45° (30° de separación entre las agujas). De esta manera, se igualan los momentos de inercia respecto de las líneas N–S (paralela a los imanes) y E–W (perpendicular a los imanes), lo que elimina la oscilación de la rosa. Asimismo, veinte años más tarde, al analizar los datos de diferentes buques, Smith y Evans descubrieron que los compases con agujas dispuestas de la manera indicada, tenían menos desvío sextantal y octantal que los de una sola aguja (y matemáticamente, dichos desvíos son nulos con la disposición indicada). Smith lo consideró una grata coincidencia, y este hecho permitió instalar los imanes y los correctores de hierro dulce mucho más cerca de la rosa en los compases con agujas múltiples, a fin de poder eliminar de forma más precisa los desvíos semicircular y cuadrantal.

(Gurney, 2005, appendix)

Esta disposición de agujas es la utilizada por los fabricantes de compases magnéticos, de manera que: la distancia angular de los polos de los imanes respecto de la línea N–S de la rosa es de 30° para el sistema de dos imanes; de 15° y 45° para cuatro; de 15° , 30° y 45° para seis, y de 15° , 25° , 35° y 45° para ocho. (Moréu, 1987, p. 71)

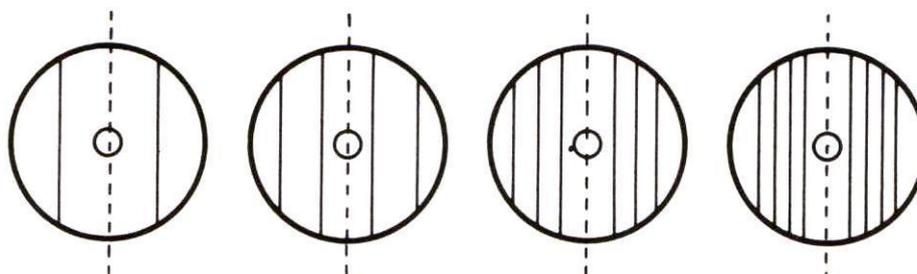


Figura 8. Disposición de los imanes en la rosa: casos más usuales. Fuente: Moréu, 1987, p. 71.

I.2. Unidades electromagnéticas

1.2.1. Sistemas basados en las unidades mecánicas y sistema CGS

SISTEMAS BASADOS EN LAS UNIDADES MECÁNICAS

Cuando empezó el estudio del electromagnetismo, se expresaron las unidades eléctricas y magnéticas como derivadas de las tres unidades mecánicas fundamentales: las de longitud (L), masa (M) y tiempo (T). Se emplearon dos sistemas (Sánchez, 1965, p. LXXX):

- i) El electrostático, que define la carga eléctrica a partir de la ley de Coulomb.
- ii) El electromagnético, que define la masa magnética a partir de la ley de Coulomb.

Independientemente del sistema empleado, se tienen las siguientes igualdades entre unidades:

$$Q = I \cdot T \quad P = U \cdot I \quad U = R \cdot I \quad Q = C \cdot U \quad U = H \cdot I/T$$

siendo: Q, carga eléctrica; I, intensidad de corriente; P, potencia; U, potencial eléctrico; R, resistencia; C, capacidad electrostática; H, inductancia electromagnética.

SISTEMA ELECTROSTÁTICO

Dadas dos cargas eléctricas Q, Q' separadas una distancia d, la fuerza que actúa sobre cada una de ellas es:

$$F = \frac{Q \cdot Q'}{d^2}$$

En dimensiones,

$$F = Q^2 \cdot L^{-2} \Rightarrow L \cdot M \cdot T^{-2} = Q^2 \cdot L^{-2} \Rightarrow Q = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$$

Luego, las demás unidades, expresadas como derivadas de las fundamentales, son:

$$I = Q \cdot T^{-1} = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-2} \quad U = P \cdot I^{-1} = L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot L^{-\frac{3}{2}} \cdot M^{-\frac{1}{2}} \cdot T^2 = L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$$

$$R = U \cdot I^{-1} = L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \cdot L^{-\frac{3}{2}} \cdot M^{-\frac{1}{2}} \cdot T^2 = L^{-1} \cdot T$$

$$C = Q \cdot U^{-1} = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \cdot L^{-\frac{1}{2}} \cdot M^{-\frac{1}{2}} \cdot T = L \quad H = U \cdot T \cdot I^{-1} = R \cdot T = L^{-1} \cdot T^2$$

SISTEMA ELECTROMAGNÉTICO

Siendo N es la unidad de masa magnética, según la ley de Coulomb aplicada a las masas magnéticas, y expresada como ecuación de dimensiones, se tiene:

$$F = N^2 \cdot L^{-2} \Rightarrow N = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$$

La ley de Laplace relaciona la fuerza que actúa sobre una carga eléctrica Q que se mueve a una velocidad V en un área de un campo magnético cuya densidad del flujo es B:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{V} \wedge \vec{B}$$

donde \wedge representa el producto vectorial.

Expresando esta igualdad en dimensiones, y teniendo en cuenta que $F = N \cdot B$, resulta que:

$$F = Q \cdot V \cdot B \Rightarrow N \cdot B = Q \cdot V \cdot B \Rightarrow Q = N \cdot V^{-1} = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \cdot L^{-1} \cdot T = L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}}$$

Por consiguiente,

$$I = Q \cdot T^{-1} = L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \quad U = P \cdot I^{-1} = L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot L^{-\frac{1}{2}} \cdot M^{-\frac{1}{2}} \cdot T = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-2}$$

$$R = U \cdot I^{-1} = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-2} \cdot L^{-\frac{1}{2}} \cdot M^{-\frac{1}{2}} \cdot T = L \cdot T^{-1}$$

$$C = Q \cdot U^{-1} = L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot L^{-\frac{3}{2}} \cdot M^{-\frac{1}{2}} \cdot T^2 = L^{-1} \cdot T^2 \quad H = U \cdot T \cdot I^{-1} = R \cdot T = L$$

SISTEMA CGS

El sistema CGS toma como unidades fundamentales el centímetro, el gramo y el segundo, y puede adoptar, tanto el sistema electromagnético, como el electrostático. Sin embargo, para las unidades eléctricas (solo para estas), no considera el centímetro y el gramo como unidades de longitud y masa, sino el cuadrante del meridiano terrestre (10^9 cm) y 10^{-11} g (Sánchez, 1965, p. LXXXII), resultando un sistema de unidades prácticas, cuyos nombres para Q, I, U, R, C, H son: culombio (C), amperio (A), voltio (V), ohmio (Ω), faradio (F), henrio (H). Todas estas unidades deben sus nombres a destacados investigadores del siglo XIX. Asimismo, las unidades derivadas del centímetro y del gramo, se llaman unidades absolutas, y se denominan: en el sistema electromagnético, abculombio (abC), abamperio (abA),..., abhenrio (abH), y en el sistema electrostático, estatoculombio (statC), estatamperio (statA),..., estatohenrio (statH).

Las relaciones entre las unidades prácticas y las del sistema electromagnético son:

$$Q = L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \Rightarrow C = (10^9 \text{ cm})^{\frac{1}{2}} \cdot (10^{-11} \text{ g})^{\frac{1}{2}} = 10^{-1} \text{ cm}^{\frac{1}{2}} \text{ g}^{\frac{1}{2}} \quad A = C \cdot s^{-1} = 10^{-1} \text{ cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot s^{-1}$$

$$U = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-2} \Rightarrow V = (10^9 \text{ cm})^{\frac{3}{2}} \cdot (10^{-11} \text{ g})^{\frac{1}{2}} \cdot s^{-2} = 10^8 \text{ cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot s^{-2}$$

$$R = L \cdot T^{-1} \Rightarrow \Omega = 10^9 \text{ cm} \cdot s^{-1} \quad C = L^{-1} \cdot T^2 \Rightarrow F = 10^{-9} \text{ cm}^{-1} \cdot s^2 \quad H = 10^9 \text{ cm} = \text{cuadrante}$$

Además, la unidad práctica de potencia recibe el nombre de vatio (W), y es la misma que la del sistema MKS (metro, kilogramo, segundo):

$$W = V \cdot A = 10^8 \text{ cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot s^{-2} \cdot 10^{-1} \text{ cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot s^{-1} = 10^7 \text{ cm}^2 \cdot \text{g} \cdot s^{-3} \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{(10^2 \text{ cm})^2} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot s^{-3}$$

RELACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS ELECTROSTÁTICO Y ELECTROMAGNÉTICO

Entre las unidades electrostáticas (indicadas por s) y las electromagnéticas (indicadas por m), existen las siguientes relaciones, donde V es la dimensión de una velocidad:

$$\frac{Q_s}{Q_m} = \frac{L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}}{L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}}} = L \cdot T^{-1} = V \quad \frac{I_s}{I_m} = \frac{Q_s \cdot T^{-1}}{Q_m \cdot T^{-1}} = \frac{Q_s}{Q_m} = V \quad \frac{U_s}{U_m} = \frac{P \cdot I_s^{-1}}{P \cdot I_m^{-1}} = \left(\frac{I_s}{I_m} \right)^{-1} = V^{-1}$$

$$\frac{R_s}{R_m} = \frac{U_s \cdot I_s^{-1}}{U_m \cdot I_m^{-1}} = \frac{U_s}{U_m} \cdot \left(\frac{I_s}{I_m} \right)^{-1} = V^{-2} \quad \frac{C_s}{C_m} = \frac{Q_s \cdot U_s^{-1}}{Q_m \cdot U_m^{-1}} = \frac{Q_s}{Q_m} \cdot \left(\frac{U_s}{U_m} \right)^{-1} = V^2$$

$$\frac{H_s}{H_m} = \frac{U_s \cdot T \cdot I_s^{-1}}{U_m \cdot T \cdot I_m^{-1}} = \frac{U_s}{U_m} \cdot \left(\frac{I_s}{I_m} \right)^{-1} = V^{-2}$$

Rüker igualó las unidades de ambos sistemas con la introducción de dos factores que dependen del medio: la permeabilidad magnética (μ) y la permitividad eléctrica (ϵ) (Sánchez, 1965, pp. LXXXI–LXXXII); de manera que:

Dadas dos masas magnéticas m , m' separadas una distancia d , la fuerza que actúa sobre cada una de ellas, no depende solamente de las masas y de la distancia, sino también del medio:

$$F = \mu \cdot \frac{m \cdot m'}{d^2}$$

Así pues, en dimensiones, se tiene:

$$N = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \cdot \mu^{-\frac{1}{2}} \Rightarrow Q_m = N \cdot V^{-1} = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \cdot \mu^{-\frac{1}{2}} \cdot L^{-1} \cdot T = L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot \mu^{-\frac{1}{2}}$$

Análogamente, la ley de Coulomb aplicada a las cargas eléctricas también depende del medio:

$$F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{Q \cdot Q'}{d^2}$$

Por tanto,

$$Q_s = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \cdot \epsilon^{\frac{1}{2}}$$

Luego, las unidades de ambos sistemas, teniendo en cuenta ϵ , μ , son:

$$I_s = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-2} \cdot \epsilon^{\frac{1}{2}} \quad U_s = L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \cdot \epsilon^{-\frac{1}{2}} \quad R_s = L^{-1} \cdot T \cdot \epsilon^{-1} \quad C_s = L \cdot \epsilon \quad H_s = L^{-1} \cdot T^2 \cdot \epsilon^{-1}$$

$$I_m = L^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \cdot \mu^{-\frac{1}{2}} \quad U_m = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-2} \cdot \mu^{\frac{1}{2}} \quad R_m = L \cdot T^{-1} \cdot \mu \quad C_m = L^{-1} \cdot T^2 \cdot \mu^{-1} \quad H = L \cdot \mu$$

En consecuencia,

$$\frac{Q_s}{Q_m} = V \cdot \epsilon^{\frac{1}{2}} \cdot \mu^{\frac{1}{2}} \quad \frac{I_s}{I_m} = V \cdot \epsilon^{\frac{1}{2}} \cdot \mu^{\frac{1}{2}} \quad \frac{U_s}{U_m} = V^{-1} \cdot \epsilon^{-\frac{1}{2}} \cdot \mu^{-\frac{1}{2}}$$

$$\frac{R_s}{R_m} = V^{-2} \cdot \epsilon^{-1} \cdot \mu^{-1} \quad \frac{C_s}{C_m} = V^2 \cdot \epsilon \cdot \mu \quad \frac{H_s}{H_m} = V^{-2} \cdot \epsilon^{-1} \cdot \mu^{-1}$$

Además, se halló que la velocidad correspondiente a V es la de la luz (c) (Sánchez, 1965, p. LXXXI), con lo cual, al haberse igualado las unidades de ambos sistemas, resulta que:

$$1 = c \cdot \epsilon^{\frac{1}{2}} \cdot \mu^{\frac{1}{2}} = c^{-1} \cdot \epsilon^{-\frac{1}{2}} \cdot \mu^{-\frac{1}{2}} = c^{-2} \cdot \epsilon^{-1} \cdot \mu^{-1} = c^2 \cdot \epsilon \cdot \mu$$

O sea:

$$\epsilon \cdot \mu = c^{-2}$$

I.2.2. Sistema Internacional de Unidades

SISTEMA MKSA

Se ha visto que la unidad práctica de potencia en el sistema CGS es la misma que en el MKS. Este resultado da pie a pensar que el sistema MKS con las unidades prácticas del CGS formaría un sistema absoluto o coherente (sin las potencias de 10). En 1901, Giorgi ya apuntó en esta dirección, proponiendo el sistema MKS con la introducción de una cuarta unidad básica, que actualmente, se considera el amperio (A), dando lugar al sistema MKSA (Lleó, 2008, p. 18). No obstante, para conseguir que el sistema MKSA sea coherente, hay que introducir una constante en la ley de Coulomb. En el caso de las fuerzas magnéticas, se considera que:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4\pi} \cdot \frac{m \cdot m'}{r^2}$$

siendo:

μ_0 : permeabilidad magnética del vacío, distinta que 1, y cuya dimensión hay que determinar.

μ : permeabilidad magnética relativa del medio, cuyo valor no cambia con respecto al definido en el epígrafe I.1.2, y es adimensional.

$4\pi \cdot r^2$: área de la esfera que tiene una masa magnética en su centro y la otra en su superficie.

. . .

De acuerdo con la ley de Laplace,

$$F = Q \cdot V \cdot B$$

Siendo I la unidad de intensidad de corriente eléctrica, y teniendo en cuenta que $F = N \cdot B$, resulta que:

$$N = Q \cdot V = (I \cdot T) \cdot (L \cdot T^{-1}) = I \cdot L$$

Es decir: la unidad de masa magnética en el sistema MKSA es el amperio metro (Am).

Asimismo,

$$B = \frac{F}{N} = \frac{L \cdot M \cdot T^{-2}}{I \cdot L} = M \cdot T^{-2} \cdot I^{-1}$$

En el sistema MKSA, la unidad de densidad de flujo magnético recibe el nombre de tesla (T), en honor al físico estadounidense de origen croata Nikola Tesla (Smiljan, 1856–Nueva York, 1943), quien inventó del motor de corriente alterna. Luego, $T = \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$

Además, se tiene que:

$$F = [\mu_0] \cdot \frac{N^2}{L^2} \Rightarrow [\mu_0] = \frac{F \cdot L^2}{N^2} = \frac{L \cdot M \cdot T^{-2} \cdot L^2}{I^2 \cdot L^2} = L \cdot M \cdot T^{-2} \cdot I^{-2}$$

Por tanto, la unidad de la permeabilidad magnética en el sistema MKSA es: $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$

En el sistema CGS, el factor introducido en el MKSA ($\mu_0/4\pi$) corresponde a 1, con lo cual, las potencias de 10 derivadas de las unidades prácticas, se introducen en la ley de Coulomb por medio del factor $\mu_0/4\pi$. Por consiguiente,

$$\frac{\mu_0}{4\pi} = 1 \text{ cuadrante} \cdot 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2} = 10^7 \text{ m} \cdot 10^{-14} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2} = 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$$

Y en consecuencia, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$

Luego, tomando $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, resulta que:

$$\epsilon_0 = c^{-2} \cdot \mu_0^{-1} = \frac{10^{-16}}{9} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^2 \cdot \frac{10^7}{4\pi} \text{ m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{A}^2 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$$

En el sistema MKSA, la ley de Coulomb aplicada a las cargas eléctricas, se considera de forma análoga a la de las masas magnéticas:

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon} \cdot \frac{Q \cdot Q'}{r^2} = \frac{K}{\epsilon} \cdot \frac{Q \cdot Q'}{r^2}$$

donde K recibe el nombre de constante de Coulomb, y cuyo valor es:

$$K = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} = \frac{1}{4\pi} \cdot 36\pi \cdot 10^9 = 9 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-4} \cdot \text{A}^{-2}$$

El actual Sistema Internacional de Unidades (SI) se basa en el MKSA.

UNIDADES BÁSICAS DEL SI (BIMP⁵)

El metro se definió originalmente como la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre, siendo el kilómetro la longitud de un minuto centesimal del meridiano, de forma análoga a como la milla náutica es la longitud del minuto sexagesimal. A tal efecto, se midió parcialmente el meridiano, y con el resultado obtenido, se construyó un patrón (metro patrón internacional). Hoy día, el metro se define fijando valor de la velocidad de la luz en el vacío, siendo de $299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Esta definición da la longitud del patrón de forma más precisa, aunque requiere una definición previa del segundo.

El concepto de segundo es $1/86\,400$ del día solar medio, pero debido a que el día solar medio no es un intervalo constante a lo largo de los años, es preciso dar otra definición, que actualmente es esta: el segundo es la duración de $9\,192\,631\,770$ periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133. Estas oscilaciones son computadas por los relojes atómicos, de modo que dichos relojes proporcionan un patrón del segundo muy bien determinado. Formalmente, la nueva definición de segundo (desde el 20 de mayo de 2019) no emplea el periodo, sino la frecuencia, fijando el valor de la citada oscilación del cesio en $9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$ (hercios), siendo $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$.

⁵ <http://www.bipm.org/en/home>

El kilogramo se definió originalmente como la masa de 1 dm^3 de agua a la temperatura en que alcanza su máxima densidad ($4,0 \text{ }^\circ\text{C}$). Se construyó un cilindro de platino que tuviera la masa de dicho volumen de agua a la temperatura especificada. Posteriormente, se descubrió que no se podía conseguir una cantidad de agua tan pura ni tan estable como se requería. Por ello, el patrón de masa pasó a ser directamente el cilindro de platino, que en 1889 fue sustituido por un cilindro de platino iridio de la misma masa. El kilogramo se siguió definiendo hasta el 19 de mayo de 2019 como la masa del cilindro de platino iridio conservado en el Museo de Pesas y Medidas de París. Sin embargo, el patrón ha sufrido ligeras variaciones en su masa a lo largo del tiempo, las cuales dificultan la medición de pequeñas masas. Esta problemática ha sido el principal motivo por el cual se han redefinido las unidades fundamentales del SI.

Actualmente, el kilogramo se define fijando el valor de la constante de Planck, siendo de $6,626\ 070\ 15 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ (julios segundo), unidad igual a $\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$, en la cual, el metro y el segundo han sido definidos como se ha indicado. Con la nueva definición, la medición de las masas se efectúa mediante la balanza de Kibble (hasta 2010 llamada de Watt), la cual es un instrumento diseñado por el físico inglés Brian Peter Kibble (1938–2010) para medir masas de forma muy precisa. Su principio se basa en la balanza de Ampere, que mide la fuerza ejercida entre dos bobinas, para determinar con ella, la corriente eléctrica que circula por dichas bobinas. Por el contrario, la balanza de Kibble mide la corriente eléctrica necesaria para soportar un peso, determinando así, la masa del objeto. Con la intensidad y el voltaje, se obtiene la potencia, magnitud que no depende de otras magnitudes electromagnéticas, sino únicamente mecánicas, siendo su dimensión $\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$, donde m, s ya han sido definidos. El desarrollo de esta balanza es el hecho que ha permitido la redefinición del kilogramo, al poder realizar medidas independientes de la comparación con el patrón.

Antes de la implantación del SI, el sistema técnico de unidades ya consideró cuatro magnitudes fundamentales: longitud, fuerza, tiempo y temperatura, siendo la unidad de temperatura el grado Celsius ($^\circ\text{C}$). El SI adopta el kelvin (K) como unidad fundamental de temperatura, cuya definición es: $1/273,16$ de la temperatura absoluta del punto triple del agua. Con esta definición, se consigue que $\text{K} = ^\circ\text{C}$, aunque $n \text{ K} = (n - 273,16) ^\circ\text{C}$. Asimismo, con las nuevas definiciones de las unidades fundamentales del SI, el kelvin se define fijando el valor de la constante de Boltzmann, siendo de $1,380\ 649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ (julios por kelvin), unidad igual a $\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, donde m, kg, s ya han sido definidos.

Asimismo, en el SI, se considera una unidad electromagnética como fundamental. Giorgi propuso el ohmio, pero en tal caso, las unidades de intensidad de corriente, carga y potencial eléctrico tendrían exponentes fraccionarios, de acuerdo con la expresión $P = R \cdot I^2$. En cambio, si se considera el amperio, el culombio o el voltio, se evitan los exponentes fraccionarios. De estas unidades, el amperio tiene la ventaja de que la intensidad se puede medir fácilmente con un galvanómetro, a partir de la deflexión que la corriente causa en una aguja magnética.

Con anterioridad a la implantación del SI, se definía el amperio internacional como la corriente eléctrica que provoca la deposición electrolítica de la plata de una solución de nitrato de plata a un promedio de 0,001 118 g/s (Sánchez, 1965, p. LXXXIII). En el sistema MKS, y posteriormente en el SI, el amperio se definió como la intensidad de corriente eléctrica que circula por dos conductores rectilíneos, paralelos entre sí, de longitud infinita, de sección circular despreciable y separados 1 m en el vacío, cuando la fuerza mutua que actúa sobre ellos es de $2 \cdot 10^{-7}$ N por metro de conductor.

Ni la definición del amperio internacional, ni la que se adoptó en el sistema MKS, dan un patrón del amperio al estilo del metro, kilogramo y segundo. Es por este motivo que, dentro de las redefiniciones de las unidades fundamentales, se ha definido el amperio fijando el valor de la carga eléctrica elemental en $1,602\ 176\ 634 \cdot 10^{-19}$ C (culombios), siendo $C = A \cdot s$, donde s ya ha sido definido. Así como la nueva definición del kilogramo está basada en la balanza de Kibble, la nueva definición del amperio lo está en la bomba de electrones, la cual, entre otros experimentos, permite contar electrones.

I.2.3. Unidades magnéticas

SISTEMA CGS

En el sistema CGS, la ley de Coulomb aplicada a las masas magnéticas, viene dada por la siguiente expresión:

$$F = \frac{m \cdot m'}{d^2}$$

Obsérvese que la fuerza F solo depende de las masas magnéticas y de la distancia entre ellas, sin que intervenga ningún factor adicional.

Luego, siendo N la unidad de masa magnética, resulta que:

$$L \cdot M \cdot T^{-2} = \frac{N^2}{L^2} \Rightarrow N^2 = L^3 \cdot M \cdot T^{-2} \Rightarrow N = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} = \text{cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$$

Esta unidad no recibe ningún nombre específico, aunque todas las unidades magnéticas derivan de ella.

La intensidad de campo magnético (H) viene dada por la siguiente expresión:

$$F = m \cdot H \Rightarrow H = \frac{F}{m}$$

En dimensiones,

$$H = \frac{F}{N} = \frac{L \cdot M \cdot T^{-2}}{L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}} = L^{-\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} = \text{cm}^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$$

Esta unidad recibe el nombre de oersted (Oe), en honor al físico y químico danés Hans Christian Ørsted (Rudkøbing, 1777–Copenhague, 1851), quien descubrió la relación entre el magnetismo y la electricidad.

La coercitividad de un imán corresponde a la intensidad de campo magnético necesaria para desimantarlo, y por tanto, se expresa en oersteds.

Por su parte, el flujo magnético viene dado por la siguiente expresión:

$$B = \frac{\Phi}{A} \Rightarrow \Phi = B \cdot A$$

En ella, la densidad de flujo magnético (B) tiene la misma dimensión que la intensidad de campo, ya que la permeabilidad magnética es adimensional, con lo cual,

$$\Phi = B \cdot A = L^{-\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \cdot L^2 = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} = \text{cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$$

Esta unidad es la misma que la de masa magnética, ya que el flujo y la masa magnética corresponden a un determinado número de líneas de fuerza. Por este motivo, inicialmente esta unidad se llamó línea, pero se le cambió el nombre por máxwell, en honor al físico escocés James Clerk Maxwell (Edimburgo, 1831–Cambridge 1879), quien presentó la teoría unificada del electromagnetismo.

Asimismo, la densidad de flujo magnético no se expresa en oersteds, sino en máxwells por centímetro cuadrado (Mx/cm²), y dado que el SI emplea principalmente el tesla (T), se ha dado nombre a su equivalente en el sistema CGS, de manera que hoy día, en lugar de referirse al máxwell por centímetro cuadrado, se emplea el gauss (G), nombre dado en honor al matemático y físico alemán Carl Friedrich Gauss (Brunswick, 1777–Gotinga, 1855), quien propuso el sistema mm–mg–s (precursor del CGS) en 1832 como primer sistema racional de unidades.

Con las unidades de intensidad de campo y de densidad de flujo magnético en el sistema CGS, ocurre lo mismo que entre la velocidad angular y la frecuencia en SI, pues un radián por segundo (rad/s) es diferente de un hercio (Hz), pero la dimensión de ambas unidades es s⁻¹.

Citar por último, que el momento magnético (M) de un imán tiene la siguiente dimensión:

$$M = N \cdot L = L^{\frac{3}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} \cdot L = L^{\frac{5}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1} = \text{cm}^{\frac{5}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$$

SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Para hallar la relación entre las unidades del sistema CGS y las del SI, se debe:

i) Tener en cuenta el valor y la dimensión del amperio: $A = 10^{-1} \text{cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$

ii) Determinar una magnitud que no dependa de la permeabilidad magnética, a fin de hallar la relación entre las unidades de ambos sistemas, ya que en el CGS, la permeabilidad no tiene dimensión.

iii) Tener en cuenta el valor y la dimensión de la permeabilidad magnética, a fin de aplicarla a las unidades de las magnitudes que dependan de ella: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$

Respecto del punto ii), se debe tener en cuenta que en el SI, la fuerza de atracción o repulsión entre masas magnéticas se expresa como sigue:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4\pi} \cdot \frac{m \cdot m'}{r^2}$$

A fin de eliminar la permeabilidad magnética de esta igualdad, se expresa la fuerza en función de la intensidad de campo magnético (H):

$$\mu_0 \cdot \mu \cdot m \cdot H = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4\pi} \cdot \frac{m \cdot m'}{r^2}$$

Con lo cual,

$$H = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{m'}{r^2}$$

Luego, la unidad de intensidad de campo magnético en el sistema CGS, expresada en unidades del SI, es:

$$\begin{aligned} \text{Oe} &= \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\text{N}}{\text{L}^2} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\text{L}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{M}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{T}^{-1}}{\text{L}^2} = \frac{1}{4\pi} \cdot \text{L}^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{M}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{T}^{-1} \\ \text{Oe} &= \frac{1}{4\pi} \cdot \text{cm}^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} = \frac{10}{4\pi} \cdot \frac{10^{-1} \text{cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}} = \frac{10}{4\pi} \frac{\text{A}}{\text{cm}} \cdot \frac{10^2 \text{cm}}{\text{m}} = \frac{10^3}{4\pi} \frac{\text{A}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Por tanto, en el SI, la intensidad de campo magnético se expresa en amperios por metro, siendo la relación entre las unidades de ambos sistemas, la que se acaba de obtener.

La unidad de masa magnética en el sistema CGS es: $\text{cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$; la cual, expresada en unidades del SI, resulta:

$$\text{cm}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} = 10 \cdot 10^{-1} \text{cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm} = 10 \text{A} \cdot \text{cm} \cdot \frac{\text{m}}{10^2 \text{cm}} = 10^{-1} \text{A} \cdot \text{m}$$

Y la unidad de momento magnético en sistema CGS es: $\text{cm}^{\frac{5}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$; la cual, expresada en unidades del SI, resulta:

$$\text{cm}^{\frac{5}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} = 10 \cdot 10^{-1} \text{cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{g}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2 = 10 \text{A} \cdot \text{cm}^2 \cdot \frac{\text{m}^2}{(10^2 \text{cm})^2} = 10^{-3} \text{A} \cdot \text{m}^2$$

Finalmente, respecto del punto iii), se tiene:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \mathbf{H}$$

Por consiguiente, la unidad de densidad de flujo magnético en el sistema CGS ($\text{Mx}/\text{cm}^2 = \text{G}$), expresada en unidades del SI, es:

$$\frac{\text{Mx}}{\text{cm}^2} = \text{G} = \mu_0 \cdot \text{Oe} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \frac{10^3}{4\pi} \text{A} \cdot \text{m}^{-1} = 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1} = 10^{-4} \text{T}$$

En consecuencia, se puede hallar la relación entre la unidad de flujo magnético del sistema CGS (Mx) y la del SI, denominada wéber (Wb), en honor al físico alemán Wilhem Eduard Weber (Wittenberg, 1804–Gotinga, 1891):

$$\frac{\text{Mx}}{\text{cm}^2} = 10^{-4} \text{T} \Rightarrow \text{Mx} = 10^{-4} \text{T} \cdot \text{cm}^2 \cdot \frac{\text{m}^2}{(10^2 \text{cm})^2} = 10^{-8} \text{T} \cdot \text{m}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$$

Asimismo, la unidad de permeabilidad magnética puede expresarse en teslas metro por amperio:

$$\mu_0 \cdot \mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} \Rightarrow [\mu_0] = \frac{\text{T}}{\text{A} \cdot \text{m}^{-1}} = \text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$$

Y de manera más sintética, en henrios por metro (H/m), de acuerdo con la expresión de la inductancia de un solenoide:

$$\mathbf{H} = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot n^2 \cdot \mathbf{A}}{\ell} \Rightarrow \mu_0 = \frac{\mathbf{H} \cdot \ell}{\mu \cdot n^2 \cdot \mathbf{A}}$$

donde: H es la inductancia (expresada en H); ℓ , la longitud de la bobina (m); n, el número de espiras (adimensional); μ , la permeabilidad relativa del núcleo (adimensional), y A, el área de la sección transversal del bobinado (m^2). Por tanto, $[\mu_0] = \text{H/m}$, resultado coherente con el hecho de que en el sistema CGS, la dimensión de la inductancia es una longitud y $\mu_0 = 1$.

TABLA RESUMEN DE EQUIVALENCIAS ENTRE LAS UNIDADES DEL SISTEMA CGS Y DEL SI

Magnitud	Unidad CGS	Unidad SI	Equivalencia
Longitud	centímetro, cm	metro, m	cm = 10 ⁻² m
Masa	gramo, g	kilogramo, kg	g = 10 ⁻³ kg
Tiempo	segundo, s	segundo, s	misma unidad
Velocidad lineal	cm/s	m/s	cm/s = 10 ⁻² m/s
Velocidad areolar	cm ² /s = St ^a	m ² /s ^a	cm ² /s = 10 ⁻⁴ m ² /s
Aceleración	gal, Gal ^b = cm/s ²	m/s ²	Gal = 10 ⁻² m/s ²
Fuerza	dina, dyn = g·Gal	newton, N = kg·m/s ²	dyn = 10 ⁻⁵ N
Trabajo, energía	ergio, erg = dyn·cm	julio, J = N·m	erg = 10 ⁻⁷ J
Potencia	erg/s	vatio, W = J/s	erg/s = 10 ⁻⁷ W
Presión	baria = dyn/cm ² bar = 10 ⁶ baria	pascal, Pa = N/m ²	baria = 10 ⁻¹ Pa mbar ^c = hPa ^c
Densidad	g/cm ³	kg/m ³	g/cm ³ = 10 ³ kg/m ³
Viscosidad dinámica	poise, P = g·cm ⁻¹ ·s ⁻¹	Pa·s	P = 10 ⁻¹ Pa·s cP ^c = mPa·s ^c
Viscosidad cinemática (viscosidad dinámica / densidad)	stokes, St = cm ² /s	m ² /s	St = 10 ⁻⁴ m ² /s cSt ^c = mm ² /s ^c
Intensidad de corriente eléctrica	amperio, A = 10 ⁻¹ cm ^{1/2} ·g ^{1/2} ·s ⁻¹	amperio, A: unidad básica	misma unidad
Masa magnética	cm ^{3/2} ·g ^{1/2} ·s ⁻¹	A·m	ucgs ^d = 10 ⁻¹ A·m
Momento magnético	cm ^{5/2} ·g ^{1/2} ·s ⁻¹	A·m ²	ucgs ^d = 10 ⁻³ A·m ²
Intensidad de campo magnético	oersted, Oe = cm ^{-1/2} ·g ^{1/2} ·s ⁻¹	A/m	Oe = 10 ³ /4π ^e A/m
Flujo magnético	máxwell, Mx = cm ^{3/2} ·g ^{1/2} ·s ⁻¹	wéber, Wb	Mx = 10 ⁻⁸ Wb
Densidad de flujo magnético	gauss, G = Mx/cm ² = cm ^{-1/2} ·g ^{1/2} ·s ⁻¹	tesla, T	G = 10 ⁻⁴ T
Carga eléctrica	culombio, C = A·s = 10 ⁻¹ cm ^{1/2} ·g ^{1/2}	culombio, C = A·s	misma unidad
Potencial eléctrico	voltio, V = W/A = 10 ⁸ cm ^{3/2} ·g ^{1/2} ·s ⁻²	voltio, V = W/A	misma unidad
Resistencia eléctrica	ohmio, Ω = V/A = cuad. ^f /s = 10 ⁹ cm/s ^g	ohmio, Ω = V/A	misma unidad
Resistividad eléctrica	Ω·cm = cuad. ^f /s·cm = 10 ⁹ St ^a	Ω·m	Ω·cm = 10 ⁻² Ω·m
Capacidad electrostática	faradio, F = C/V = s ² /cuad. ^f = 10 ⁻⁹ Gal ^{-1h}	faradio, F = C/V	misma unidad
Inductancia electromagnética	henrio, H = Ω·s = cuadrante ^f = 10 ⁹ cm	henrio, H = Ω·s	misma unidad
Permeabilidad magnética	1	T·m/A = H/m	1 = 4π·10 ^{-7c} H/m

a, f, g, h Coincide con la unidad (o con un múltiplo o submúltiplo de ella) de: viscosidad cinemática (a); longitud (f); cuadrante del meridiano terrestre = 10⁹ cm; velocidad (g); inversa de la aceleración (h).

^b Nombre dado en honor a Galileo Galilei, que fue el primero en medir la aceleración de la gravedad.

^c Múltiplo o submúltiplo común. ^d Unidad del sistema CGS.

^e El factor 4π se introduce en ciertas fórmulas, llamadas *racionalizadas*, en las cuales se basan las unidades del SI.

Tabla 1. Equivalencias entre las unidades del sistema CGS y del SI. Fuente: Propia.

I.3. Elementos del campo magnético terrestre

La Tierra se comporta como un imán gigantesco, en el que: el polo magnético que se encuentra cerca del polo N geográfico es el polo S magnético, dado que el N de la aguja es atraído por él, y el polo magnético próximo al S geográfico es el N magnético. No obstante, se llama polo N magnético (Nm) al polo próximo al N geográfico, y polo S magnético (Sm) al cercano al S geográfico, de forma que en las denominaciones, prima el criterio geográfico en lugar del magnético. Entre ambos polos magnéticos, se originan las líneas de fuerza del campo magnético terrestre. Como en todo cuerpo, estas líneas salen del polo magnético N (Sm) y entran por el polo magnético S (Nm), siendo este el motivo por el que se dirigen, geográficamente, de S a N.

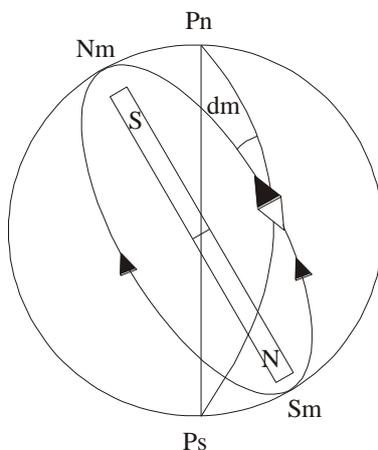


Figura 9. Imán representativo del magnetismo terrestre. Fuente: Propia.

La posición de los polos magnéticos varía lentamente a lo largo de los años, razón por la cual, cambia la declinación magnética (dm). Como referencia, citar que en el año 2015, el polo Nm estaba en 86,27° N 159,18° W (en el N de Canadá), y el polo Sm, en 64,26° S 136,59° E (cerca de la Antártida, aproximadamente al S de Tasmania) (WMM2015, p. 18), En 2020, el polo Nm se situó en 86,50° N 164,04° W, dirigiéndose hacia Siberia, y el Sm, en 64,07° S 135,88° E (WMM2020, p. 17). Los dos polos no se encuentran diametralmente opuestos, y además, cada uno de ellos tiene una variación propia. El polo Sm se mueve lentamente, pero no así el Nm.

La densidad del flujo magnético terrestre varía entre los 67 μT , alrededor del polo Sm, y los 23 μT , en la zona central de Sudamérica (WMM2020, p. 5; *vide* Figura 12).

En unidades del sistema CGS, es más común expresar el campo magnético mediante su intensidad (en oersteds, Oe) que mediante su densidad de flujo. Así pues, teniendo en cuenta que la permeabilidad magnética relativa del aire es prácticamente igual a la del vacío, la *equivalencia* entre microteslas y oersteds es:

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu} \approx \frac{B}{\mu_0} = \frac{\mu\text{T}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}} = \frac{10^{-6} \text{T}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}} = \frac{10}{4\pi} \text{ A/m} \cdot \frac{\text{Oe}}{\frac{10^3}{4\pi} \text{ A/m}} = 10^{-2} \text{ Oe}$$

Es decir: $\mu T \equiv 10^{-2}$ Oe. Luego, la intensidad del campo magnético terrestre varía entre 0,67 Oe y 0,23 Oe. Asimismo, de la Tabla 2, se desprende que $\mu T = 10^{-2}$ G, con lo cual, $Oe \equiv G$.

A la densidad del flujo magnético o a la intensidad del campo magnético terrestre en un determinado punto, se la denomina fuerza total por unidad de masa magnética (F). Dicha fuerza total F se descompone en una fuerza horizontal H y en otra vertical Z, a la vez que la inclinación de F respecto al horizonte viene dada por el ángulo θ , cumpliéndose que: $\tan \theta = Z/H$. Este ángulo también recibe el nombre de latitud magnética. Asimismo, en el ecuador magnético, tanto Z, como θ , son nulas; mientras que en los polos, $H = 0$ y $\theta = 90^\circ$.

La fuerza H está desviada, respecto del meridiano geográfico, la dm , y la fuerza Z se dirige hacia abajo en el hemisferio N magnético (el que contiene el polo N_m) y hacia arriba en el hemisferio S_m . Los signos de Z, θ son positivos en el hemisferio N_m , y negativos en el S_m .

Además, la fuerza H se descompone en una fuerza X, que se dirige hacia el N geográfico, y en otra Y, que se dirige hacia el E (+) o hacia el W (-); siendo: $X = H \cdot \cos dm$, $Y = H \cdot \sin dm$

Por tanto, en un punto determinado, los elementos del campo magnético terrestre son:

$$F \quad dm \quad \theta \quad H \quad Z \quad X \quad Y$$

Con lo cual, el campo magnético puede expresarse por medio de⁶:

- i) La fuerza total F y los ángulos dm, θ (F, dm, θ)
- ii) Los componentes H, Z y el ángulo dm (H, Z, dm)
- iii) Los componentes X, Y, Z (X, Y, Z)

La forma empleada en compensación de agujas náuticas es la segunda (H, Z, dm), aunque también suele emplearse la siguiente: (H, dm, θ). En lugar de emplear la primera (F, dm, θ), se prefiere esta última, dado que el componente H es el que orienta la aguja.

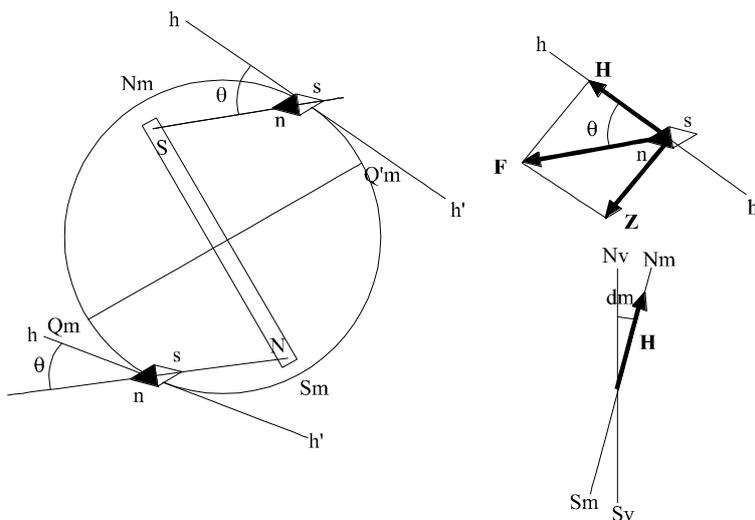


Figura 10. Elementos del campo magnético terrestre. Fuente: Propia.
Para simplificar la Figura, solo se considera el efecto del polo más próximo a la aguja.

⁶ https://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/comp-en.php

Los valores de estos elementos se plasman en cartas magnéticas, que se clasifican según las líneas que estén trazadas en ellas. Pueden ser isomagnéticas o isóporas. Las primeras constan de líneas que unen puntos en los que un elemento del campo magnético terrestre tiene el mismo valor, y las segundas, de líneas que unen puntos donde un elemento tiene la misma variación. Según el elemento del que se trate, las cartas isomagnéticas se dividen en: isógonas o isogónicas (igual dm), isoclinas (igual θ), isodinámicas totales (igual F), isodinámicas horizontales (igual H), isodinámicas horizontales de componente N, E (igual X , Y respectivamente) e isodinámicas verticales (igual Z). Análogamente, las cartas isóporas, se clasifican en: isalogónicas (igual variación de dm), isaloclinas (igual variación de θ), isalodinámicas totales (igual variación de F), isalodinámicas horizontales, horizontales de componente N y horizontales de componente E (igual variación de H , X , Y respectivamente) e isalodinámicas verticales (igual variación de Z). En las cartas isógonas, la línea que une los puntos donde la dm es nula recibe el nombre de línea agónica, y en las cartas isoclinas, la línea que une los puntos donde la inclinación es nula, se denomina ecuador magnético o línea acina. (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 32; WMM2020, p. 23)

A continuación, se muestran algunas cartas isomagnéticas para el año 2020. Se emplea la proyección Miller⁷, a fin de poder representatr los polos magnéticos (indicados por estrellas); las fuerzas por unidad de masa magnética se expresan en nanoteslas, y las zonas en gris claro y gris oscuro corresponden a las áreas de no fiabilidad de la aguja (*vide* epígrafe II.8.2).

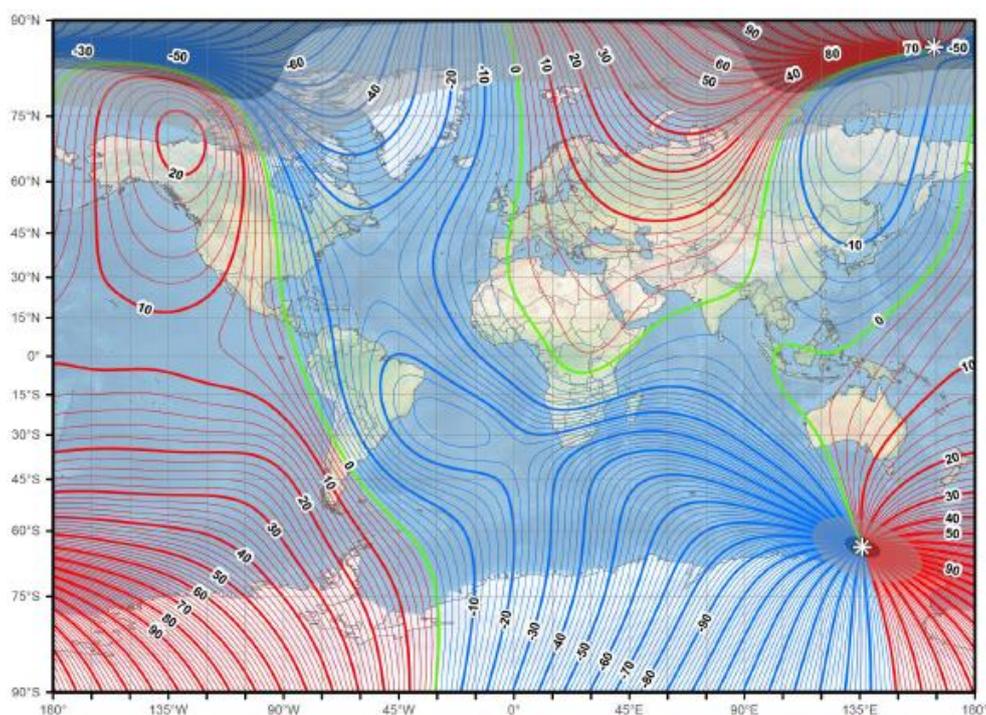


Figura 11. Carta isógonas. Fuente: WMM2020. p. 73.

⁷ Modificación de la proyección Mercator, en la que la latitud aumentada (φ_a) de una latitud φ , se altera en un factor de $4/5$: $\varphi_a = 225^\circ/\pi \cdot \ln \tan(45^\circ + 2/5 \cdot \varphi)$ <https://mathworld.wolfram.com/MillerCylindricalProjection.html>

Hay cuatro puntos donde convergen las líneas isógonas: los dos polos magnéticos y los dos geográficos. En la carta, estos últimos son las líneas de latitud 90°.

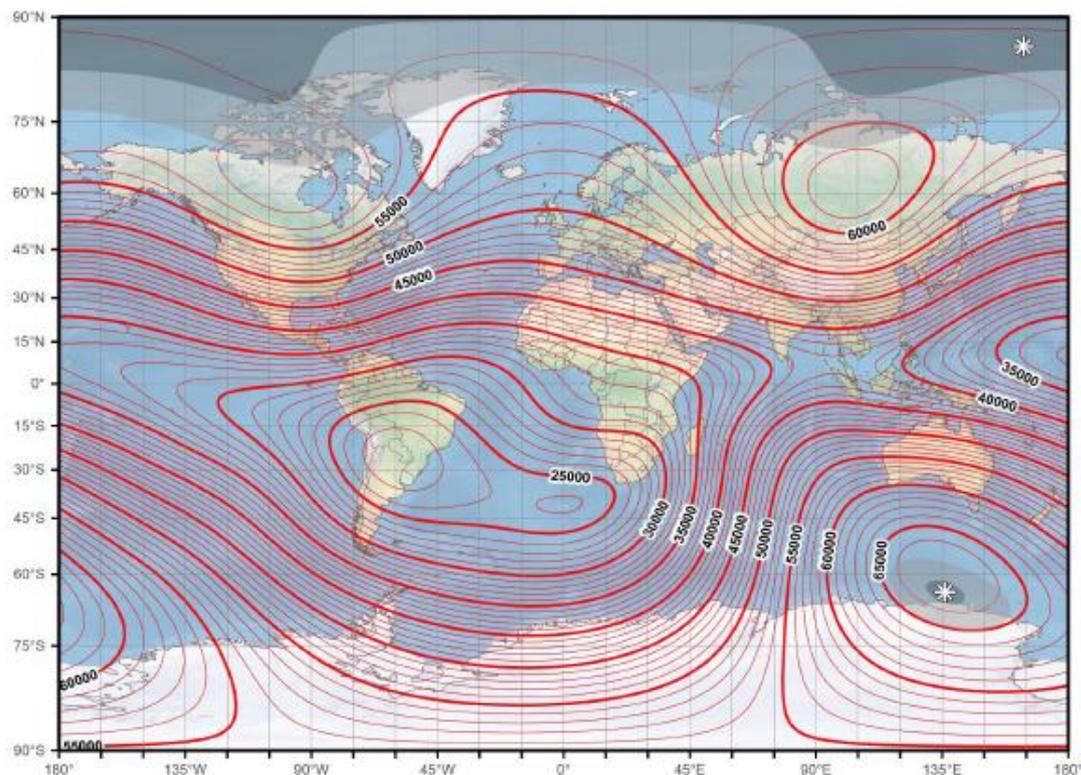


Figura 12. Carta isodinámica total. Fuente: WMM2020. p. 72.

Hay un mínimo en la zona central de Sudamérica, y tres máximos: uno, alrededor del polo Sm, y dos, cerca del polo Nm, uno en Canadá y otro en Siberia.

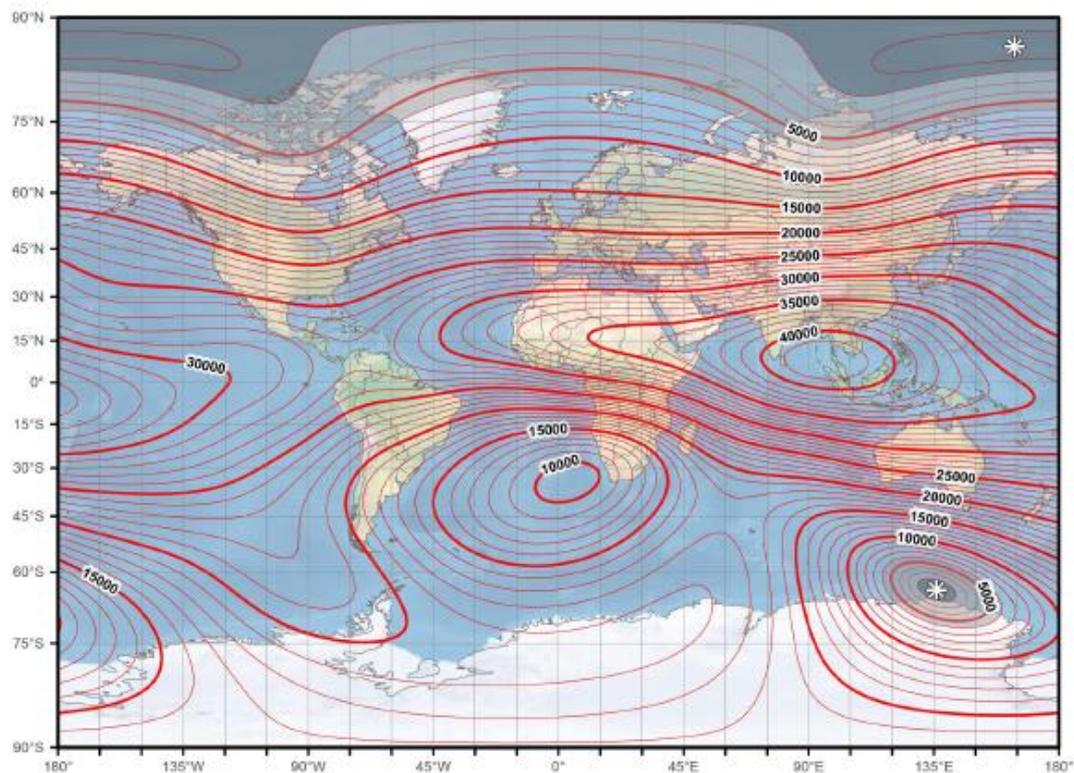


Figura 13. Carta isodinámica horizontal. Fuente: WMM2020. p. 72.

El componente horizontal H es nulo en los polos magnéticos; su máximo valor está en el SE asiático, y hay un mínimo relativo al W de Sudáfrica.

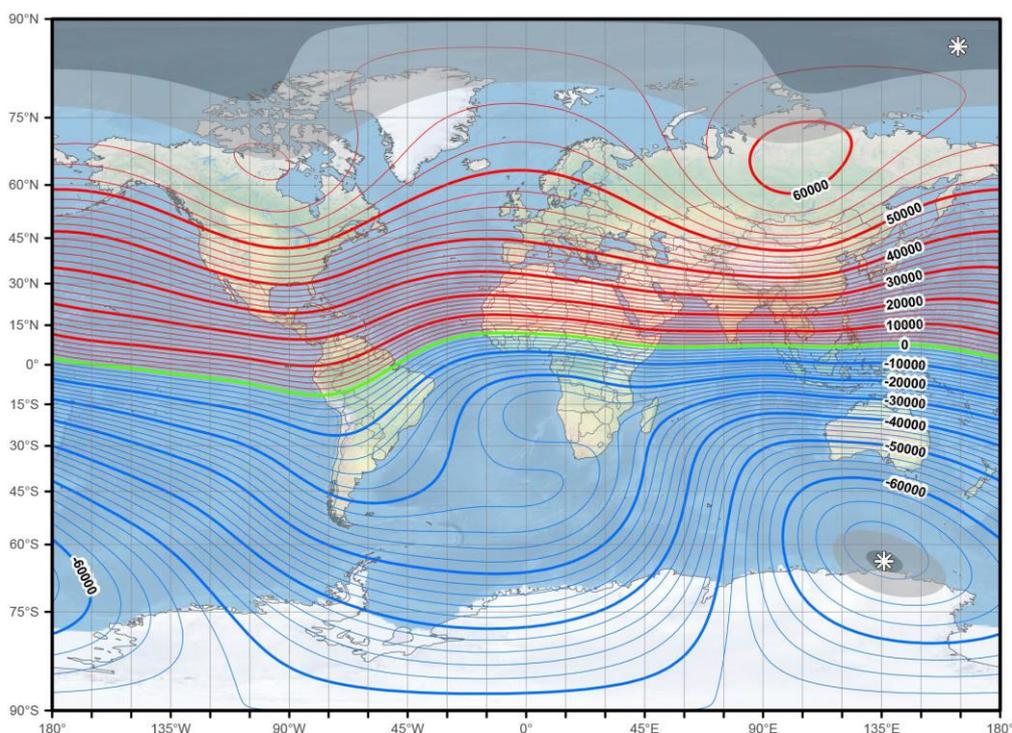


Figura 14. Carta isodinámica vertical. Fuente: WMM2020. p. 71.

Se observa que las fuerzas verticales son más intensas que las horizontales.

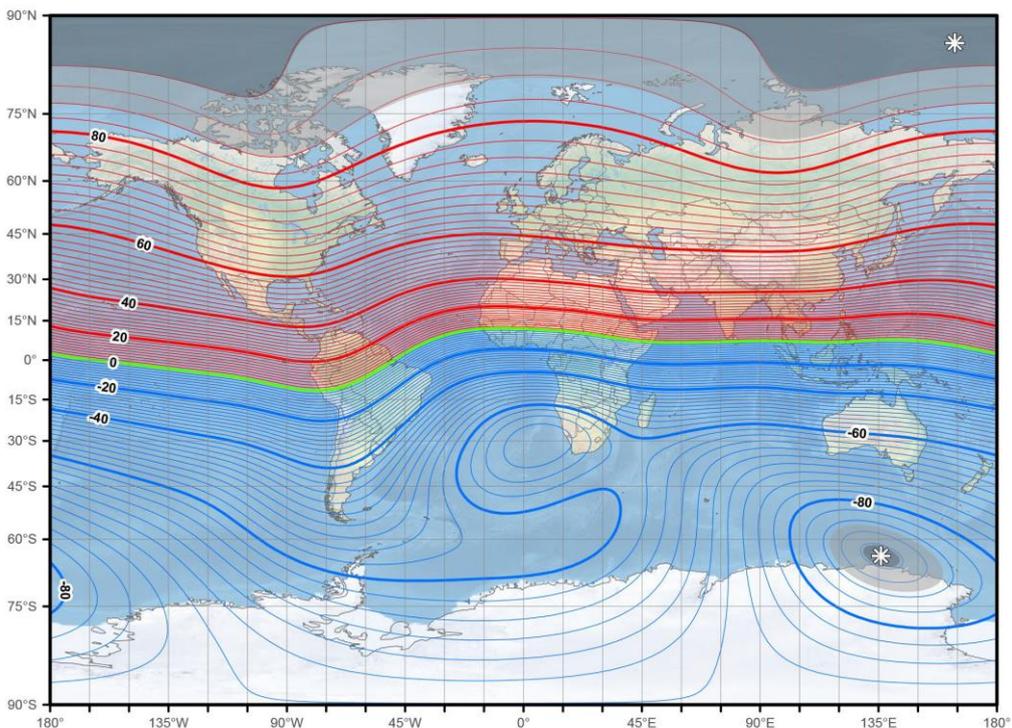


Figura 15. Carta isoclina. Fuente: WMM2020. p. 73.

Como consecuencia de que las fuerzas verticales son más intensas que las horizontales, en las latitudes bajas y medias, las latitudes magnéticas aumentan más rápidamente que las

geográficas. Asimismo, el ecuador magnético coincide con la isodinámica vertical nula, y hay un máximo relativo que corresponde al mínimo relativo de H .

Además, los elementos del campo magnético terrestre sufren los siguientes cambios (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 31):

i) Cambios seculares: consisten en pequeñas variaciones que con el tiempo adquieren un gran valor. El caso más conocido por los marinos es el de la dm .

ii) Cambios periódicos: se trata de oscilaciones diurnas y anuales debidas a la influencia del sol y la luna, pero que no son interesantes para la navegación dada su pequeñez.

iii) Cambios irregulares: son variaciones anómalas debidas a la naturaleza magnética de algunos fondos submarinos.

A continuación, se muestra la carta isalógica correspondiente al periodo 2020–2025. La variación se expresa en minutos sexagesimales por año.

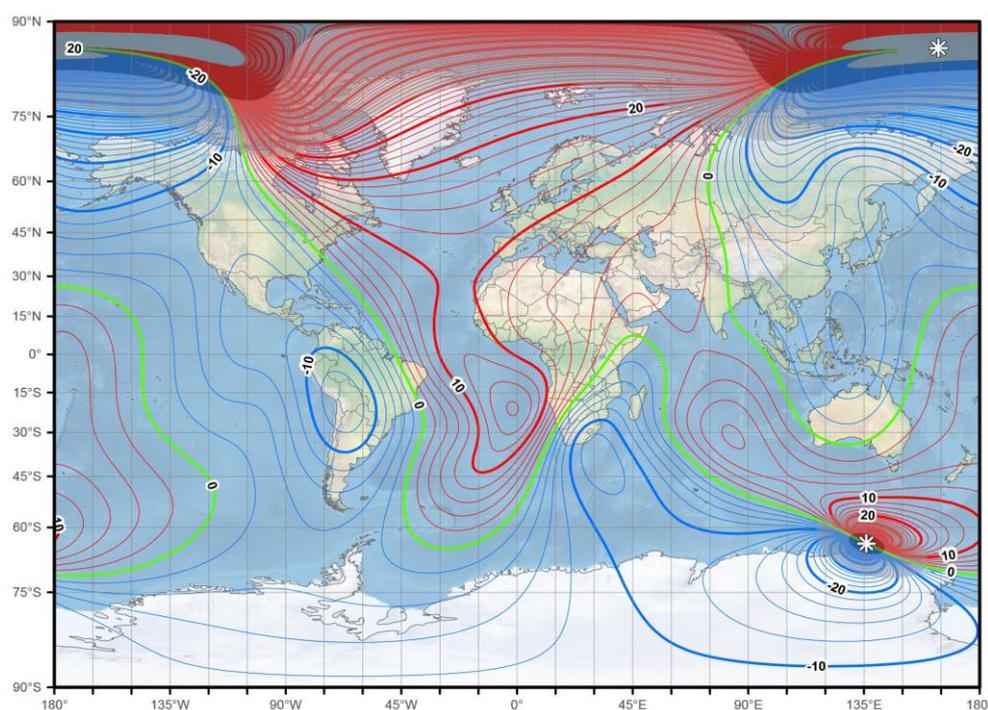


Figura 16. Carta isalógica. Fuente: WMM2020. p. 85.

Tradicionalmente, las fuerzas F , H , Z se han expresado en unidades relativas, llamadas unidades Gauss, tales que en Londres, $H = 1$ (Moréu, 1987, p. 165). En el momento en que se determinó la equivalencia, la unidad Gauss era de $18,5 \mu\text{T} \equiv 0,185 \text{ Oe}$. Este valor se fijó como constante, pero el valor de H en Londres ha cambiado, siendo en el año 2020, de $19,54 \mu\text{T}$. Asimismo, la potencia absoluta de los imanes correctores de las bitácoras clásicas, se basa en los desvíos que producen en Glasgow, donde $H = 0,9$ (Moréu, 1987, pp. 164-165); pero a pesar de la variación de H con el tiempo, el valor relativo de dicha fuerza entre Glasgow y Londres, se ha mantenido, pues en 2020, $H = 17,35 \mu\text{T}$ en Glasgow, equivalente a $0,888$ unidades Gauss ($17,35/19,54$), con lo cual, el error al considerar $0,9$ es despreciable ($1,33 \%$).

**PARTE II: ESTUDIO SOBRE LA
COMPENSACIÓN DE AGUJAS
NÁUTICAS**

II. 1. Campos magnéticos que afectan a la aguja

II.1.1. Introducción

La aguja náutica se ve afectada por tres campos magnéticos:

- i) El terrestre, que es el principal.
- ii) El permanente del buque, debido a los hierros duros del buque.
- iii) El inducido del buque, debido a los hierros dulces, los cuales se inducen según el rumbo.

El objetivo de la compensación es contrarrestar los campos magnéticos permanente e inducido del buque, de modo que la aguja solo quede afectada por el campo magnético terrestre.

Las fuerzas por unidad de masa magnética de cada uno de estos tres campos se expresan por F , F' y F'' respectivamente. Estas fuerzas actúan, tanto en el N de la aguja, como en el S, generando un par de fuerzas (momento director) que orienta la aguja según la dirección de la resultante de las tres fuerzas. No obstante, comúnmente se dice que estas fuerzas *actúan sobre el N de la aguja*, haciendo mención a un solo polo. Por tanto, no debe confundirse esta forma de hablar con lo que realmente sucede en una aguja.

II.1.2. Magnetismo terrestre

El campo magnético terrestre tiene dos efectos sobre la aguja: como efecto deseado, la orienta; pero también induce los hierros dulces, los cuales crean el campo magnético inducido.

Como se indicó en el capítulo I.3, la fuerza F se descompone en una horizontal H y en una vertical Z , siendo la fuerza H la que orienta la aguja. Asimismo, H se descompone en una fuerza longitudinal X y en otra transversal Y , de forma que la fuerza total F se desglosa en tres componentes relativos al buque: X , Y , Z , los cuales son los responsables de las inducciones longitudinal, transversal y vertical de los hierros dulces.

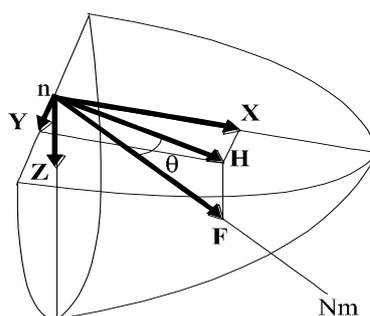


Figura 17. Descomposición de la fuerza F según los ejes propios del buque. Fuente: Propia.

Cuando se estudia el campo magnético terrestre (capítulo I.3), los componentes X , Y de la fuerza H se consideran relativos al horizonte (hacia el N y hacia el E respectivamente), pero en compensación de agujas náuticas, H se debe descomponer en dos fuerzas relativas al rumbo, que son las que inducen longitudinal y transversalmente los hierros dulces. Es por este motivo que se toma el sistema de referencia formado por la línea de fe de la rosa (eje x) y dos ejes perpendiculares a ella (y , z), los cuales pasan por el centro de la rosa.

II.1.3. Magnetismo permanente del buque

La fuerza F' se descompone según los ejes propios del buque (que pasan por el centro de la rosa, siendo el eje x la línea de fe) en: una longitudinal P , una transversal Q y una vertical R . Cada uno de estos componentes es análogo a la fuerza que ejercería un imán, por cuanto el efecto de los hierros duros se puede considerar como el de tres imanes P , Q , R .

Las fuerzas P , Q , R son positivas cuando se dirigen hacia proa, estribor y abajo respectivamente, y negativas cuando se dirigen hacia popa, babor y arriba; o lo que es lo mismo: los imanes P , Q , R son positivos si tienen sus polos S a proa, estribor y abajo, y negativos en los casos contrarios. Siendo la Figura 18 la proa del buque, los valores de P , Q , R son positivos. (Moréu, 1987, p. 78)

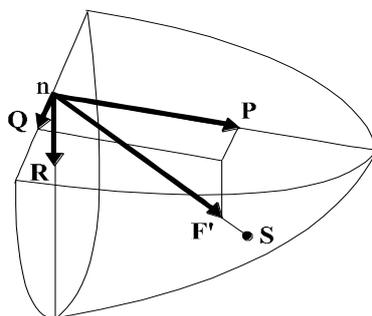


Figura 18. Fuerzas debidas al magnetismo permanente del buque. Fuente: Propia.

Con el buque adrizado, la fuerza R no causa ningún desvío. Sin embargo, cada una de las fuerzas P , Q se descompone en una fuerza directriz (F_d') hacia el N_m o hacia el S_m , y en una fuerza perturbadora (F_p') hacia el E_m o hacia el W_m . Las fuerzas F_d' aumentan o disminuyen la intensidad de la fuerza H , mientras que las F_p' desvían la aguja del meridiano magnético.

Sea R el rumbo magnético (no confundirlo con el imán R):

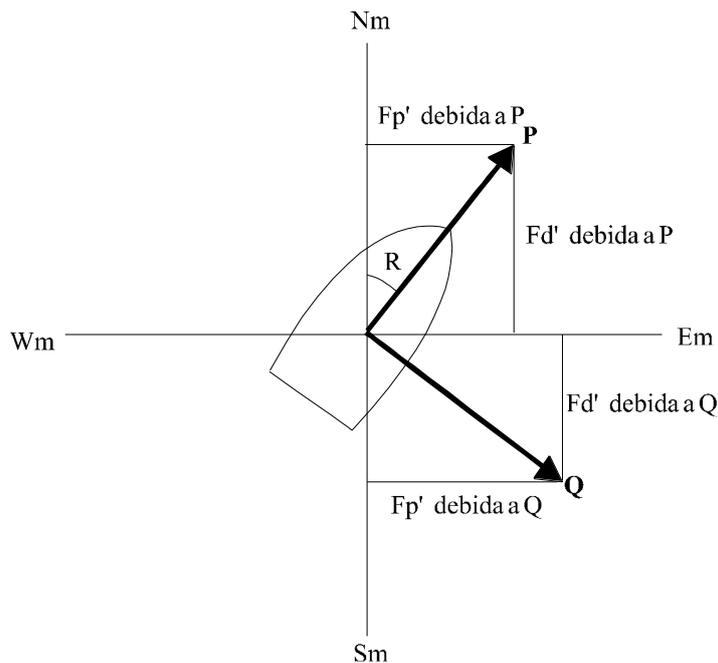


Figura 19. Fuerzas directrices y perturbadoras debidas al magnetismo permanente del buque. Fuente: Propia.

De la Figura 19, se desprende que las fuerzas directriz y perturbadora totales son:

$$F_d' = P \cdot \cos R + Q \cdot \cos(R + 90^\circ) = P \cdot \cos R - Q \cdot \sin R$$

$$F_p' = P \cdot \sin R + Q \cdot \sin(R + 90^\circ) = P \cdot \sin R + Q \cdot \cos R$$

II.1.4. Magnetismo inducido del buque

SUSTITUCIÓN DEL EFECTO DE LOS HIERROS DULCES DEL BUQUE POR NUEVE VARILLAS

La inducción de los hierros dulces se debe al magnetismo terrestre, de modo que la fuerza F'' depende de F .

Siendo X', Y', Z' los componentes longitudinal, transversal y vertical de F'' , y X, Y, Z los de F (todos ellos según los ejes propios de buque que pasan por el centro de la rosa, siendo el eje x la línea de fe), la relación entre F'' y F es (Moréu, 1987, pp. 79–82):

$$X' = a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z$$

$$Y' = d \cdot X + e \cdot Y + f \cdot Z$$

$$Z' = g \cdot X + h \cdot Y + k \cdot Z$$

donde:

- i) a, \dots, k son coeficientes propios de cada buque.
- ii) $a \cdot X, b \cdot Y, c \cdot Z$ son las fuerzas longitudinales debidas a las inducciones longitudinal, transversal y vertical respectivamente del magnetismo terrestre.
- iii) $d \cdot X, e \cdot Y, f \cdot Z$ son las fuerzas transversales originadas por las inducciones longitudinal, transversal y vertical.
- iv) $g \cdot X, h \cdot Y, k \cdot Z$ son las fuerzas verticales causadas por las inducciones longitudinal, transversal y vertical.

. . .

El efecto de los coeficientes a, \dots, k es el mismo que el de nueve varillas imaginarias, tales que:

- i) Las varillas a, b, c tienen un extremo sobre el eje longitudinal del buque, de forma que al inducirse, dicho extremo se convierte en un polo magnético, el cual ejerce una fuerza longitudinal sobre la aguja. La varilla a sigue la dirección longitudinal, mientras que las varillas b, c son paralelas a los ejes transversal y vertical del buque respectivamente.
- ii) Las varillas d, e, f tienen un extremo sobre el eje transversal, originando, al inducirse, fuerzas transversales sobre la aguja. La varilla e sigue la dirección transversal, mientras que las varillas d, f son paralelas a los ejes longitudinal y vertical.
- iii) Las varillas g, h, k tienen un extremo sobre el eje vertical, provocando fuerzas verticales sobre la aguja. La varilla k sigue el eje vertical, mientras que las varillas g, h son paralelas a los ejes longitudinal y transversal.

En la Figura 20, se muestra la disposición de las nueve varillas.

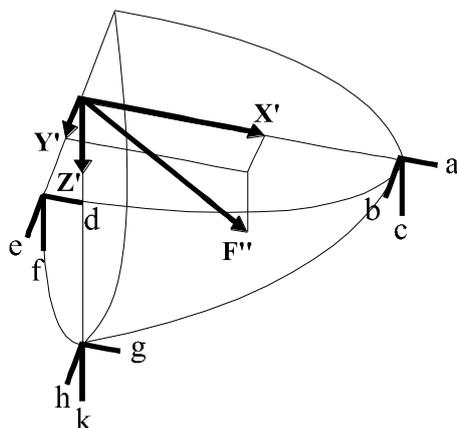


Figura 20. Magnetismo inducido: sustitución del efecto de los hierros dulces del buque por nueve varillas. Fuente: Propia.

Las varillas a, e, k se encuentran en los ejes longitudinal, transversal y vertical respectivamente, y se inducen a lo largo del mismo eje sobre el que afectan a la aguja. Así por ejemplo, la varilla a queda inducida por el componente longitudinal X, y actúa también longitudinalmente sobre la aguja. Estas tres varillas se denominan simétricas, tomando el nombre de asimétricas las otras seis (NGA, 2004, pp. 9-12).

Cabe señalar dos aspectos incorrectos al sustituir el efecto de los hierros dulces por las nueve varillas. En primer lugar, cuando una varilla se induce, sus dos extremos se convierten en polos magnéticos, pero solo se considera el que está sobre el eje del buque, y en segundo lugar, los polos de toda varilla no se encuentran en sus extremos, sino aproximadamente a 1/12 de su longitud (Moréu, 1987, p. 172). No obstante, estos dos aspectos únicamente habrá que tenerlos en cuenta cuando se utilicen varillas reales para compensar el efecto de las imaginarias, y de hecho, solo en la barra Flinders.

SIGNOS DE LAS VARILLAS

Las varillas del mismo tipo (las a, las b, etc.) pueden ser positivas o negativas. Las de la Figura 20 se consideran positivas, siendo dicha figura la proa del buque, y son negativas las que contrarrestan su efecto. También son positivas las que: sin estar en la posición de la Figura 20 (por ejemplo a popa del compás), contrarrestan el efecto de una negativa.

Análisis del signo de las varillas de tipo b

Por definición, si una varilla b tiene su polo activo a proa del compás y el inactivo (el que no se considera) a estribor del activo, es positiva. Luego, otra b con el polo activo a proa del compás y el inactivo a babor del activo, es negativa, ya que contrarresta el efecto de la anterior. Como se muestra en la Figura 21, a un mismo rumbo magnético, se invierte el signo del desvío (Δ).

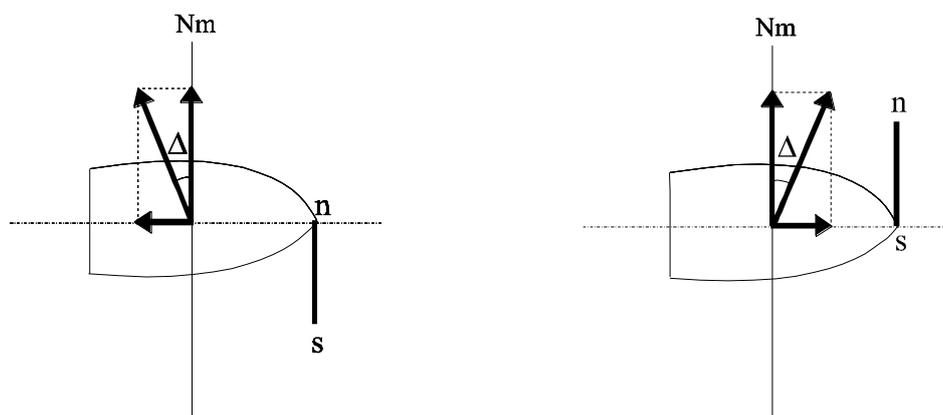


Figura 21. Polarización y efecto de las varillas b a proa del compás. Fuente: Propia.

Asimismo, una varilla b con su polo activo a popa del compás y el inactivo a estribor del activo, es igualmente negativa, puesto que también contrarresta la varilla positiva.

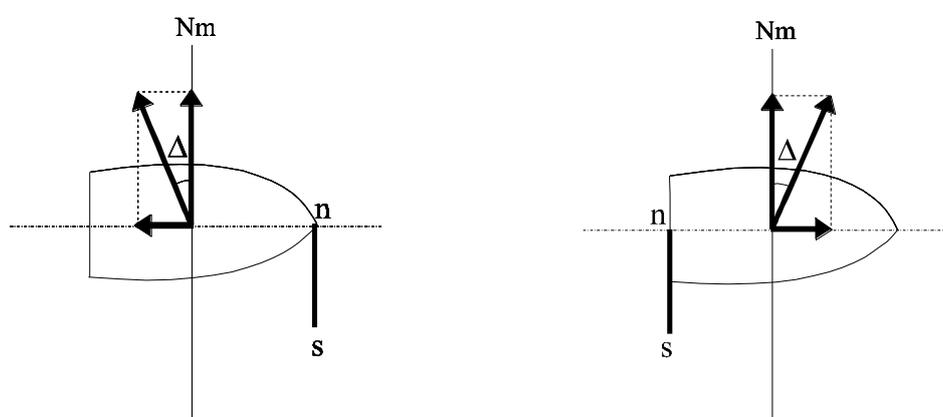


Figura 22. Polarización y efecto de las varillas b a estribor del compás. Fuente: Propia.

Por último, una varilla b con el polo activo a popa del compás y el inactivo a babor del activo, es positiva, ya que contrarresta la anterior varilla negativa.

Regla de signos para las varillas asimétricas

Efectuando un análisis para cada tipo de varilla asimétrica, como el que se ha hecho con las varillas de tipo b, se obtiene la siguiente regla de signos:

- i) El signo de una varilla es el producto de los signos de sus polos.
- ii) El polo activo es positivo si está a proa, estribor o debajo del compás, y negativo si se encuentra a popa, babor o encima.
- iii) El polo inactivo es positivo si está a proa, estribor o debajo del polo activo, y negativo si se encuentra a popa, babor o encima.

En resumen: proa, estribor y debajo son positivos, y popa, babor y encima, negativos. Así por ejemplo, una varilla c con su polo activo a popa del compás y el inactivo encima del activo, es positiva, pues el activo es negativo por estar a popa, y el inactivo, también negativo por estar encima, con lo cual, al multiplicar dos negativos, da positivo ($- \cdot - = +$).

Análisis del signo de las varillas de tipo a

Una varilla a siempre está sobre el eje longitudinal, de forma que en principio, solo tiene dos posibles posiciones: a proa o a popa del compás.

A los rumbos N/Sm, ninguna varilla a produce desvío, dado que coincide con el meridiano magnético. Asimismo, a los rumbos E/Wm, tampoco causa ningún desvío, ya que la varilla no se induce, por encontrarse perpendicular a dicho meridiano. A los demás rumbos, el signo del desvío originado por una varilla a es el mismo, tanto si está a proa, como a popa del compás (se puede comprobar fácilmente al NE). Por tanto, una varilla a a popa no contrarresta otra a a proa, y en consecuencia, la de popa es igualmente positiva. En este sentido, es aplicable el criterio de signos de las varillas asimétricas, pues a proa, $+ \cdot + = +$, y a popa, $- \cdot - = +$.

Cabe preguntarse, entonces, qué varilla contrarresta las positivas, y la respuesta es una continua que tenga una parte a proa y otra a popa del compás, siendo ambas partes iguales, a fin de que la fuerza que ejerzan sus dos polos tenga la misma intensidad, y en consecuencia, la resultante sea una fuerza únicamente longitudinal.

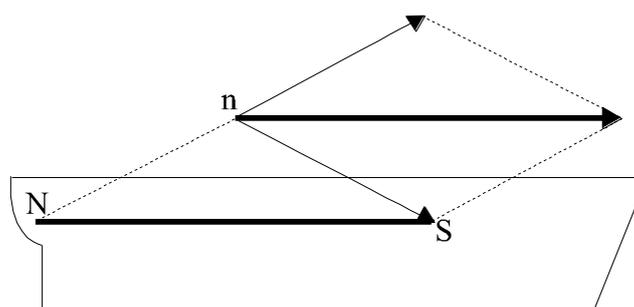


Figura 23. Varilla a negativa. Fuente: Propia.

Obsérvese que, en esta varilla, los dos polos se consideran activos.

Regla de signos para las varillas simétricas

Con las varillas e, k, ocurre lo mismo que con las a: si están a un lado del compás (estribor o babor para las e, y arriba o abajo para las k), son positivas; mientras que si están a ambos lados, son negativas.

Luego, la regla de signos para las varillas simétricas es la siguiente:

Las varillas a un solo lado del compás, son positivas, y las que están a ambos lados, negativas.

En el siguiente cuadro (Figura 24), se visualizan los signos de cada varilla.

Cuadro resumen del signo de las varillas

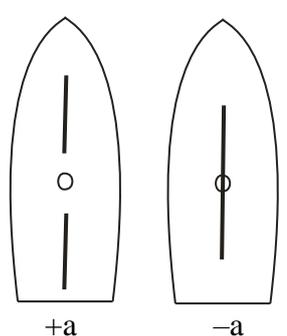
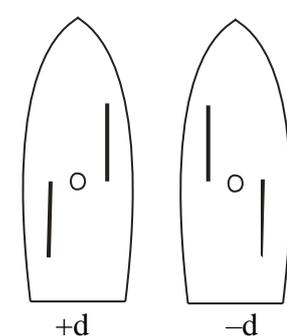
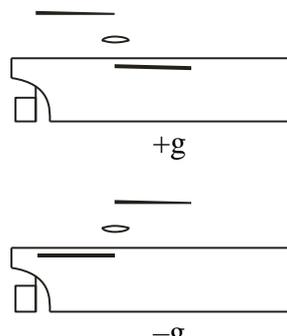
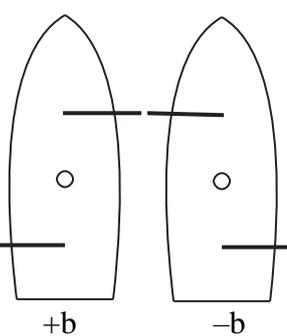
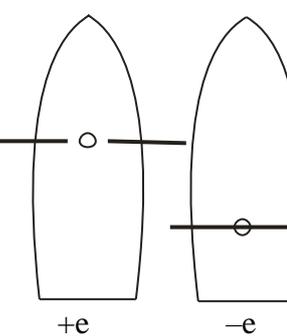
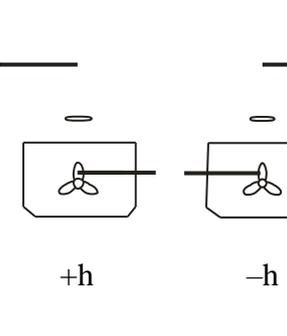
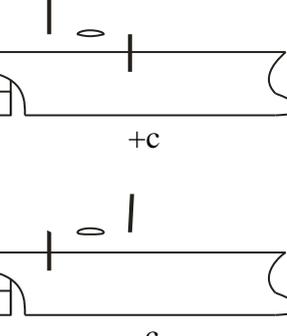
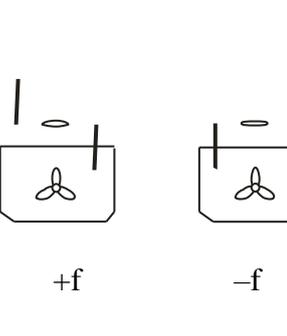
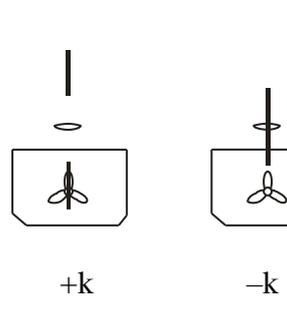
	Varillas que actúan en el eje longitudinal	Varillas que actúan en el eje transversal	Varillas que actúan en el eje vertical
Varillas longitudinales inducidas por X			
Varillas transversales inducidas por Y			
Varillas verticales inducidas por Z			

Figura 24. Signos de las varillas. Fuente: Propia.

FUERZAS CAUSADAS POR LAS VARILLAS

De forma análoga a las fuerzas P, Q, las fuerzas X', Y' provocan en el N de la aguja una fuerza directriz (Fd'') y otra perturbadora (Fp''), siendo:

$$Fd'' = X' \cdot \cos R - Y' \cdot \sin R \quad Fp'' = X' \cdot \sin R + Y' \cdot \cos R$$

Pero:

$$X' = a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z \quad Y' = d \cdot X + e \cdot Y + f \cdot Z$$

Luego,

$$Fd'' = a \cdot X \cdot \cos R + b \cdot Y \cdot \cos R + c \cdot Z \cdot \cos R - d \cdot X \cdot \sin R - e \cdot Y \cdot \sin R - f \cdot Z \cdot \sin R$$

$$Fp'' = a \cdot X \cdot \sin R + b \cdot Y \cdot \sin R + c \cdot Z \cdot \sin R + d \cdot X \cdot \cos R + e \cdot Y \cdot \cos R + f \cdot Z \cdot \cos R$$

Asimismo, X e Y dependen de H, a la vez que Z depende de H y θ :

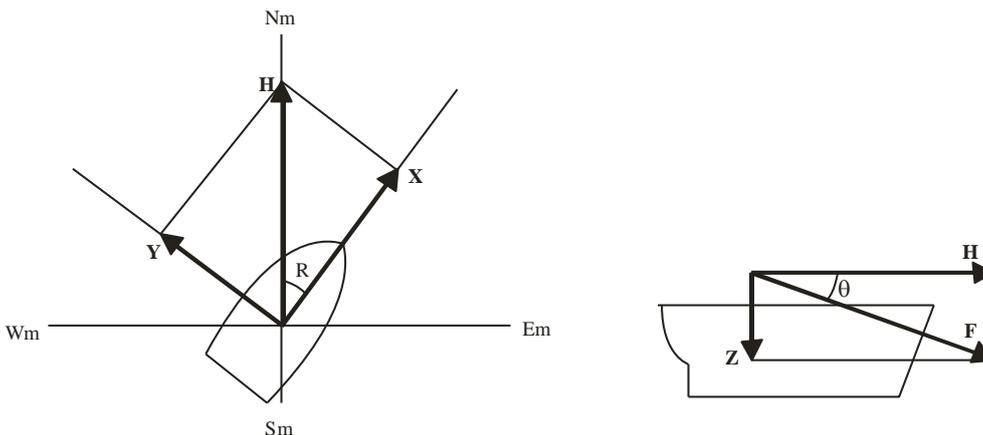


Figura 25. Relación entre los componentes relativos al buque (X, Y, Z) y H, θ . Fuente: Propia.

Con respecto a los ejes propios del buque,

$$X = H \cdot \cos(360^\circ - R) = H \cdot \cos R \quad Y = H \cdot \sin(360^\circ - R) = -H \cdot \sin R$$

$$\tan \theta = \frac{Z}{H} \Rightarrow Z = H \cdot \tan \theta$$

En consecuencia,

$$\begin{aligned} Fd'' &= a \cdot H \cdot \cos^2 R - b \cdot H \cdot \sin R \cdot \cos R + c \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \cos R - \\ &\quad - d \cdot H \cdot \cos R \cdot \sin R + e \cdot H \cdot \sin^2 R - f \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \sin R \\ Fp'' &= a \cdot H \cdot \cos R \cdot \sin R - b \cdot H \cdot \sin^2 R + c \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \sin R + \\ &\quad + d \cdot H \cdot \cos^2 R - e \cdot H \cdot \sin R \cdot \cos R + f \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \cos R \end{aligned}$$

Desarrollando,

$$\begin{aligned} Fd'' &= c \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \cos R - f \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \sin R - \frac{1}{2}(d + b) \cdot H \cdot \sin 2R + a \cdot H \cdot \cos^2 R + e \cdot H \cdot \sin^2 R \\ Fp'' &= c \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \sin R + f \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \cos R + \frac{1}{2}(a - e) \cdot H \cdot \sin 2R + d \cdot H \cdot \cos^2 R - b \cdot H \cdot \sin^2 R \end{aligned}$$

Pero:

$$a \cdot H \cdot \cos^2 R + e \cdot H \cdot \sin^2 R = \frac{1}{2} a \cdot H \cdot \cos^2 R + \frac{1}{2} a \cdot H \cdot \cos^2 R + \frac{1}{2} e \cdot H \cdot \sin^2 R + \frac{1}{2} e \cdot H \cdot \sin^2 R$$

Y aplicando la fórmula del coseno del ángulo doble, se tiene:

$$\begin{aligned} a \cdot H \cdot \cos^2 R + e \cdot H \cdot \sin^2 R &= \\ &= \frac{1}{2} a \cdot H \cdot (\cos 2R + \sin^2 R) + \frac{1}{2} a \cdot H \cdot \cos^2 R + \frac{1}{2} e \cdot H \cdot (\cos^2 R - \cos 2R) + \frac{1}{2} e \cdot H \cdot \sin^2 R \\ &= \frac{1}{2}(a - e) \cdot H \cdot \cos 2R + \frac{1}{2} a \cdot H \cdot (\sin^2 R + \cos^2 R) + \frac{1}{2} e \cdot H \cdot (\cos^2 R + \sin^2 R) = \\ &= \frac{1}{2}(a - e) \cdot H \cdot \cos 2R + \frac{1}{2}(a + e) \cdot H \end{aligned}$$

Análogamente,

$$d \cdot H \cdot \cos^2 R - b \cdot H \cdot \sin^2 R = \frac{1}{2}(d + b) \cdot H \cdot \cos 2R + \frac{1}{2}(d - b) \cdot H$$

Por tanto,

$$F_{d''} = c \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \cos R - f \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \sin R - \frac{1}{2}(d + b) \cdot H \cdot \sin 2R + \frac{1}{2}(a - e) \cdot H \cdot \cos 2R + \frac{1}{2}(a + e) \cdot H$$

$$F_{p''} = c \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \sin R + f \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \cos R + \frac{1}{2}(a - e) \cdot H \cdot \sin 2R + \frac{1}{2}(d + b) \cdot H \cdot \cos 2R + \frac{1}{2}(d - b) \cdot H$$

II.1.5. Efecto conjunto de los tres campos magnéticos

El campo magnético terrestre provoca una fuerza directriz H, mientras que los magnetismos permanente e inducido del buque originan las fuerzas directrices Fd', Fd''. Por consiguiente, la fuerza directriz total o fuerza al N (Fn) es:

$$F_n = H + F_{d'} + F_{d''}$$

$$F_n = H + P \cdot \cos R - Q \cdot \sin R + c \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \cos R - f \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \sin R - \frac{1}{2}(d + b) \cdot H \cdot \sin 2R + \frac{1}{2}(a - e) \cdot H \cdot \cos 2R + \frac{1}{2}(a + e) \cdot H$$

$$F_n = \left[1 + \frac{1}{2}(a + e)\right] \cdot H + (P + c \cdot H \cdot \tan \theta) \cdot \cos R - (Q + f \cdot H \cdot \tan \theta) \cdot \sin R + \frac{1}{2}(a - e) \cdot H \cdot \cos 2R - \frac{1}{2}(d + b) \cdot H \cdot \sin 2R$$

Asimismo, la fuerza perturbadora total o fuerza al E (Fe) es:

$$F_e = F_{p'} + F_{p''}$$

$$F_e = P \cdot \sin R + Q \cdot \cos R + c \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \sin R + f \cdot H \cdot \tan \theta \cdot \cos R + \frac{1}{2}(a - e) \cdot H \cdot \sin 2R + \frac{1}{2}(d + b) \cdot H \cdot \cos 2R + \frac{1}{2}(d - b) \cdot H$$

$$F_e = \frac{1}{2}(d - b) \cdot H + (P + c \cdot H \cdot \tan \theta) \cdot \sin R + (Q + f \cdot H \cdot \tan \theta) \cdot \cos R + \frac{1}{2}(a - e) \cdot H \cdot \sin 2R - \frac{1}{2}(d + b) \cdot H \cdot \cos 2R$$

Luego, a cada rumbo magnético, estas dos fuerzas determinan una resultante H', así como el desvío a dicho rumbo.

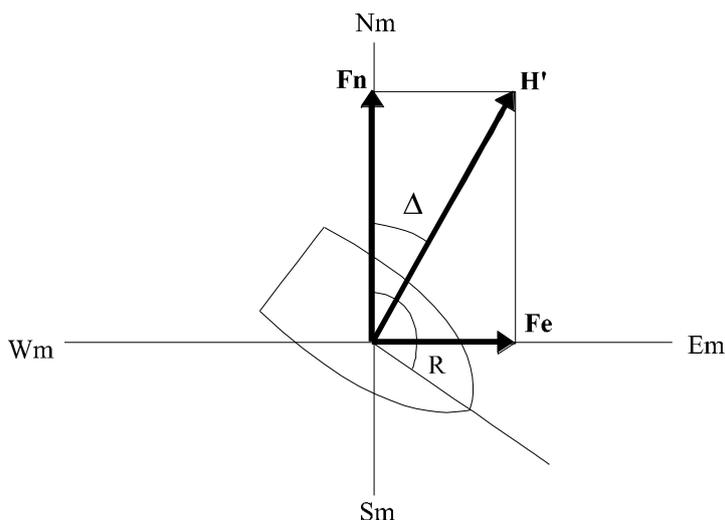


Figura 26. Fuerzas determinantes del desvío a un rumbo magnético dado. Fuente: Propia.

$$\sin \Delta = \frac{F_e}{H'} \quad \cos \Delta = \frac{F_n}{H'}$$

II.1.6. Fuerza directriz media y coeficiente λ

Particularizando la expresión de F_n para k rumbos magnéticos equidistantes, repartidos en los 360° , se obtiene un promedio de dicha fuerza, que se conoce como fuerza directriz media (F_{nm}) (Moréu, 1987, pp. 88–89).

Para todo k ,

$$F_{nm} = \frac{1}{k} \cdot \sum_k F_n = \left[1 + \frac{1}{2}(a + e)\right] \cdot H$$

Demostración para los ocho rumbos magnéticos principales:

Término de F_n	R	Valor de la razón trigonométrica								Sumas Parciales
		0	45	90	135	180	225	270	315	
$\left[1 + \frac{1}{2}(a + e)\right] \cdot H$										$8\left[1 + \frac{1}{2}(a + e)\right] \cdot H$
$(P + c \cdot H \cdot \tan \theta) \cdot \cos R$		1	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	0	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	0	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	0
$-(Q + f \cdot H \cdot \tan \theta) \cdot \sin R$		0	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	0	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	0
	2R	0	90	180	270	0	90	180	270	
$\frac{1}{2}(a - e) \cdot H \cdot \cos 2R$		1	0	-1	0	1	0	-1	0	0
$-\frac{1}{2}(d + b) \cdot H \cdot \sin 2R$		0	1	0	-1	0	1	0	-1	0
Suma total									$8\left[1 + \frac{1}{2}(a + e)\right] \cdot H$	

Tabla 2. Suma de las expresiones de F_n a los ocho rumbos magnéticos principales. Fuente: Propia.

$$F_{nm} = \frac{1}{8} \cdot 8 \left[1 + \frac{1}{2}(a + e)\right] \cdot H = \left[1 + \frac{1}{2}(a + e)\right] \cdot H$$

. . .

Se define el coeficiente λ como la relación entre las fuerzas F_{nm} y H :

$$\lambda = \frac{F_{nm}}{H} = \frac{\left[1 + \frac{1}{2}(a + e)\right] \cdot H}{H} = 1 + \frac{1}{2}(a + e)$$

Este coeficiente, también llamado coeficiente de la fuerza directriz media, indica la cantidad promedio de la fuerza H que hay en el emplazamiento de la aguja para orientarla (Moréu, 1987, pp. 89–90).

Asimismo, sustituyendo $1 + \frac{1}{2}(a + e)$ por λ en la expresión de F_n , resulta que:

$$F_n = \lambda \cdot H + (P + c \cdot H \cdot \tan \theta) \cdot \cos R - (Q + f \cdot H \cdot \tan \theta) \cdot \sin R + \frac{1}{2}(a - e) \cdot H \cdot \cos 2R - \frac{1}{2}(d + b) \cdot H \cdot \sin 2R$$

II.2. Coeficientes, ecuaciones y clasificación de los desvíos

II.2.1. Coeficientes exactos y ecuación exacta del desvío

Sacando factor común $\lambda \cdot H$ en las expresiones de las fuerzas F_n y F_e , resulta que:

$$F_n = \lambda \cdot H \cdot \left[1 + \left(\frac{P}{\lambda \cdot H} + \frac{c}{\lambda} \cdot \tan \theta \right) \cdot \cos R - \left(\frac{Q}{\lambda \cdot H} + \frac{f}{\lambda} \cdot \tan \theta \right) \cdot \sin R + \frac{a-e}{2\lambda} \cdot \cos 2R - \frac{d+b}{2\lambda} \cdot \sin 2R \right]$$

$$F_e = \lambda \cdot H \cdot \left[\frac{d-b}{2\lambda} + \left(\frac{P}{\lambda \cdot H} + \frac{c}{\lambda} \cdot \tan \theta \right) \cdot \sin R + \left(\frac{Q}{\lambda \cdot H} + \frac{f}{\lambda} \cdot \tan \theta \right) \cdot \cos R + \frac{a-e}{2\lambda} \cdot \sin R + \frac{d+b}{2\lambda} \cdot \cos 2R \right]$$

Los términos que dependen de los imanes y de las varillas, que a la vez se repiten en ambas expresiones (excepto el primero de F_e), se definen como los coeficientes exactos del desvío (Moréu, 1987, pp. 94-95):

$$\alpha = \frac{d-b}{2\lambda} \quad \beta = \frac{P}{\lambda \cdot H} + \frac{c}{\lambda} \cdot \tan \theta \quad \gamma = \frac{Q}{\lambda \cdot H} + \frac{f}{\lambda} \cdot \tan \theta \quad \delta = \frac{a-e}{2\lambda} \quad \varepsilon = \frac{d+b}{2\lambda}$$

Luego,

$$F_n = H' \cdot \cos \Delta = \lambda \cdot H \cdot (1 + \beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \sin R + \delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \sin 2R)$$

$$F_e = H' \cdot \sin \Delta = \lambda \cdot H \cdot (\alpha + \beta \cdot \sin R + \gamma \cdot \cos R + \delta \cdot \sin 2R + \varepsilon \cdot \cos 2R)$$

De estas igualdades, se obtiene la ecuación exacta del desvío (Moréu, 1987, p. 95):

$$\frac{F_n}{F_e} = \frac{\cos \Delta}{\sin \Delta} = \frac{1 + \beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \sin R + \delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \sin 2R}{\alpha + \beta \cdot \sin R + \gamma \cdot \cos R + \delta \cdot \sin 2R + \varepsilon \cdot \cos 2R}$$

Desarrollando,

$$\begin{aligned} \cos \Delta \cdot (\alpha + \beta \cdot \sin R + \gamma \cdot \cos R + \delta \cdot \sin 2R + \varepsilon \cdot \cos 2R) &= \\ = \sin \Delta \cdot (1 + \beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \sin R + \delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \sin 2R) & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin \Delta &= \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot (\sin R \cos \Delta - \cos R \sin \Delta) + \gamma \cdot (\cos R \cos \Delta + \sin R \sin \Delta) + \\ &+ \delta \cdot (\sin 2R \cos \Delta - \cos 2R \sin \Delta) + \varepsilon \cdot (\cos 2R \cos \Delta + \sin 2R \sin \Delta) \end{aligned}$$

$$\sin \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin(R - \Delta) + \gamma \cdot \cos(R - \Delta) + \delta \cdot \sin(2R - \Delta) + \varepsilon \cdot \cos(2R - \Delta)$$

Siendo R' el rumbo de aguja,

$$R - \Delta = R' \quad 2R - \Delta = 2(R' + \Delta) - \Delta = 2R' + \Delta$$

Y en consecuencia,

$$\sin \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin(2R' + \Delta) + \varepsilon \cdot \cos(2R' + \Delta)$$

II.2.2. Coeficientes aproximados y ecuaciones aproximadas del desvío

COEFICIENTES APROXIMADOS (Moréu, 1987, p. 95)

Los valores del desvío se repiten cada giro completo del buque. Por tanto, el desvío es una función periódica de R' , pudiéndose expresar por medio de la serie de Fourier:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + \dots$$

A, B, C,... reciben el nombre de coeficientes aproximados del desvío, y son unas cantidades a determinar para que se verifique la expresión en la aproximación que se tome.

ECUACIÓN APROXIMADA: PRIMERA APROXIMACIÓN (Moréu, 1987, pp. 95–96)

Se ha demostrado que la ecuación exacta del desvío es:

$$\sin \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin(2R' + \Delta) + \varepsilon \cdot \cos(2R' + \Delta)$$

La primera aproximación consiste en obviar los coeficientes α , ε , los cuales dependen de las varillas d, b, que tienen valores pequeños en casi todos los buques, ya que los hierros a babor y a estribor del compás crean varillas d, b que se contrarrestan. Por consiguiente,

$$\sin \Delta = \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin(2R' + \Delta)$$

Asimismo, se sustituye $\sin \Delta$ por $\Delta \cdot \sin 1^\circ$ (sustitución válida para ángulos pequeños) y $\sin(2R' + \Delta)$ por $\sin 2R'$, con lo cual,

$$\Delta \cdot \sin 1^\circ = \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R'$$

$$\Delta = \beta \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin R' + \gamma \cdot \csc 1^\circ \cdot \cos R' + \delta \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin 2R'$$

Y se toma la siguiente aproximación de la serie de Fourier:

$$\Delta = B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R'$$

De modo que:

$$A = 0 \quad B = \beta \cdot \csc 1^\circ \quad C = \gamma \cdot \csc 1^\circ \quad D = \delta \cdot \csc 1^\circ$$

Luego,

$$\beta = B \cdot \sin 1^\circ = \sin B \quad \gamma = \sin C \quad \delta = \sin D$$

Por tanto, la primera aproximación se expresa como sigue:

$$\Delta = B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R'$$

donde los coeficientes exactos son los senos de los aproximados (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 49).

ECUACIÓN APROXIMADA: SEGUNDA APROXIMACIÓN (Moréu, 1987, pp. 97–99)

Sin obviar los coeficientes α , ε , se tiene:

$$\sin \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin(2R' + \Delta) + \varepsilon \cdot \cos(2R' + \Delta)$$

Desarrollando,

$$\begin{aligned} \sin \Delta = & \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' \cdot \cos \Delta + \\ & + \delta \cdot \cos 2R' \cdot \sin \Delta + \varepsilon \cdot \cos 2R' \cdot \cos \Delta - \varepsilon \cdot \sin 2R' \cdot \sin \Delta \end{aligned}$$

La segunda aproximación consiste en sustituir $\sin \Delta$ en el segundo miembro de esta igualdad por su valor según la primera aproximación, $\cos \Delta$ por 1, y obviar el término $\varepsilon \cdot \sin 2R' \cdot \sin \Delta$:

$$\sin \Delta = \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \varepsilon \cdot \cos 2R' + (\beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R') + \varepsilon \cdot \cos 2R'$$

Operando,

$$\begin{aligned} \sin \Delta &= \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \varepsilon \cdot \cos 2R' + \\ &+ \delta \cdot \beta \cdot \cos 2R' \cdot \sin R' + \delta \cdot \gamma \cdot \cos 2R' \cdot \cos R' + \delta^2 \cdot \cos 2R' \cdot \sin 2R' \end{aligned}$$

Asimismo,

$$\cos 2R' \cdot \sin R' = \frac{1}{2} (\sin 3R' - \sin R') \quad (i)$$

$$\cos 2R' \cdot \cos R' = \frac{1}{2} (\cos 3R' + \cos R') \quad (ii)$$

$$\cos 2R' \cdot \sin 2R' = \frac{1}{2} \cdot \sin 4R' \quad (iii)$$

Pues:

$$\left. \begin{aligned} \sin 3R' &= \sin(2R' + R') = \sin 2R' \cdot \cos R' + \cos 2R' \cdot \sin R' \\ \sin R' &= \sin(2R' - R') = \sin 2R' \cdot \cos R' - \cos 2R' \cdot \sin R' \end{aligned} \right\} \text{Restando, se obtiene (i)}$$

$$\left. \begin{aligned} \cos 3R' &= \cos(2R' + R') = \cos 2R' \cdot \cos R' - \sin 2R' \cdot \sin R' \\ \cos R' &= \cos(2R' - R') = \cos 2R' \cdot \cos R' + \sin 2R' \cdot \sin R' \end{aligned} \right\} \text{Sumando, se obtiene (ii)}$$

$$\sin 4R' = 2 \cdot \sin 2R' \cdot \cos 2R' \quad (iii)$$

Por consiguiente,

$$\begin{aligned} \sin \Delta &= \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \varepsilon \cdot \cos 2R' + \delta \cdot \beta \cdot \frac{1}{2} \cdot \sin 3R' - \\ &- \delta \cdot \beta \cdot \frac{1}{2} \cdot \sin R' + \delta \cdot \gamma \cdot \frac{1}{2} \cdot \cos 3R' + \delta \cdot \gamma \cdot \frac{1}{2} \cdot \cos R' + \delta^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \sin 4R' \\ \sin \Delta &= \alpha + (\beta - \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \beta) \cdot \sin R' + (\gamma + \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \gamma) \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \\ &+ \varepsilon \cdot \cos 2R' + \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \beta \cdot \sin 3R' + \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \gamma \cdot \cos 3R' + \frac{1}{2} \cdot \delta^2 \cdot \sin 4R' \\ \Delta &= \alpha \cdot \csc 1^\circ + (\beta - \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \beta) \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin R' + (\gamma + \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \gamma) \cdot \csc 1^\circ \cdot \cos R' + \delta \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin 2R' + \\ &+ \varepsilon \cdot \csc 1^\circ \cdot \cos 2R' + \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \beta \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin 3R' + \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \gamma \cdot \csc 1^\circ \cdot \cos 3R' + \frac{1}{2} \cdot \delta^2 \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin 4R' \end{aligned}$$

En este caso, conviene considerar la siguiente aproximación de la serie de Fourier:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + H \cdot \sin 4R'$$

En la que:

$$A = \alpha \cdot \csc 1^\circ \quad B = (\beta - \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \beta) \cdot \csc 1^\circ \quad C = (\gamma + \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \gamma) \cdot \csc 1^\circ \quad D = \delta \cdot \csc 1^\circ$$

$$E = \varepsilon \cdot \csc 1^\circ \quad F = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \beta \cdot \csc 1^\circ \quad G = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \gamma \cdot \csc 1^\circ \quad H = \frac{1}{2} \cdot \delta^2 \cdot \csc 1^\circ$$

Y en consecuencia,

$$\alpha = A \cdot \sin 1^\circ \quad \beta = B \cdot \sin 1^\circ + \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \beta \quad \gamma = C \cdot \sin 1^\circ - \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \gamma \quad \delta = D \cdot \sin 1^\circ$$

$$\varepsilon = E \cdot \sin 1^\circ \quad \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \beta = F \cdot \sin 1^\circ \quad \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \gamma = G \cdot \sin 1^\circ \quad \frac{1}{2} \cdot \delta^2 = H \cdot \sin 1^\circ$$

O bien:

$$\alpha = \sin A \quad \beta = \sin B + \sin F \quad \gamma = \sin C - \sin G \quad \delta = \sin D$$

$$\varepsilon = \sin E \quad \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \beta = \sin F \quad \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \gamma = \sin G \quad \frac{1}{2} \cdot \delta^2 = \sin H$$

FÓRMULA PRÁCTICA DE LA ECUACIÓN APROXIMADA DEL DESVÍO

Normalmente, los coeficientes F, G, H tienen valores tan pequeños que se pueden obviar. Por tanto, la fórmula práctica de la ecuación del desvío es (Moréu, 1987, p. 99):

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R'$$

donde los coeficientes exactos son los senos de los aproximados: $\alpha, \dots, \varepsilon = \sin (A, \dots, E)$ (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 49).

Obsérvese que: $\beta = \sin B + \sin F = \sin B + \sin 0 = \sin B$, y análogamente en el caso de γ .

La fórmula práctica también es conocida con el nombre de fórmula de Archibald Smith (Martínez-Lozares, 2011, p. 89), ya que fue este matemático escocés quien la desarrolló.

II.2.3. Clasificación de los desvíos

Los términos de la ecuación aproximada del desvío se pueden clasificar según el múltiplo del rumbo de aguja del que dependen.

DESVÍO CONSTANTE (Moréu, 1987, pp. 105, 129; propio)

El desvío constante es el que no depende del rumbo, quedando formado únicamente por el coeficiente A, el cual es parte del efecto de las varillas asimétricas d, b. Por tanto, el origen de este desvío se debe a uno o a varios de los siguientes factores:

- i) El buque no es simétrico; es decir: el efecto de los hierros dulces a babor y a estribor de la línea de crujía, no se contrarresta. Un ejemplo de buque asimétrico es un portacontenedores con todas sus grúas a un mismo costado (*vide* Figura 27).
- ii) La línea de fe no está alineada con la línea de crujía, debido a una defectuosa alineación de la bitácora. Por consiguiente, en un buque simétrico (caso general), los hierros a babor a estribor de la línea de fe (eje x) no se contrarrestan, ya que: por ser el buque simétrico respecto de la línea de crujía, no lo es respecto de la línea de fe.
- iii) La línea de fe está desplazada de la línea de crujía; es decir: no coincide con ella, sino que es paralela. Un ejemplo muy ilustrativo de este caso es el de un portaaviones (*vide* Figura 28), donde el puente (y por tanto la bitácora) está a un lado de la nave, con lo cual, el efecto de los hierros dulces a babor a estribor de la línea de fe, tampoco se contrarresta.



Figura 27. Buque asimétrico. Fuente: <https://pcl.ec/fusion/>. (izda.)

Figura 28. Buque con la línea de fe desplazada de la línea de crujía (portaaviones Juan Carlos I). Fuente: <http://www.hispaviacion.es/lhd-juan-carlos-i-ganar-el-cielo-desde-el-mar/>. (dcha.)

En cualquier caso, el coeficiente A se puede corregir girando la bitácora A grados (a estribor si A es positivo, y a babor si es negativo); pero dada la complejidad de este giro, así como el escaso valor habitual de A (las varillas d, b suelen tener valores pequeños), lo aconsejable es dejar este coeficiente como un desvío residual (Moréu, 1987, p. 206).

DESVÍO SEMICIRCULAR (Moréu, 1987, pp. 105–106)

El desvío semicircular (Δ_{sc}) lo integran los términos de la ecuación aproximada que dependen del rumbo de aguja, pero de ningún múltiplo de él; es decir:

$$\Delta_{sc} = B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R'$$

Sacando factor común B,

$$\Delta_{sc} = B \cdot \left(\sin R' + \frac{C}{B} \cdot \cos R' \right)$$

Haciendo $\tan \omega = \frac{C}{B}$, donde el cuadrante de ω viene dado por los signos de B, C⁸, resulta:

$$\Delta_{sc} = B \cdot \left(\sin R' + \frac{\sin \omega}{\cos \omega} \cdot \cos R' \right) = B \cdot \frac{\sin R' \cdot \cos \omega + \cos R' \cdot \sin \omega}{\cos \omega} = B \cdot \sec \omega \cdot \sin(R' + \omega)$$

De la definición de ω , se desprende que:

$$\frac{\sin^2 \omega}{\cos^2 \omega} = \frac{C^2}{B^2} \Rightarrow B^2 \cdot \sin^2 \omega = C^2 \cdot \cos^2 \omega$$

$$B^2 \cdot \sin^2 \omega + B^2 \cdot \cos^2 \omega = C^2 \cdot \cos^2 \omega + B^2 \cdot \cos^2 \omega \Rightarrow B^2 = (B^2 + C^2) \cdot \cos^2 \omega$$

⁸ Si B y C son positivos, ω pertenece al primer cuadrante; si B es negativo, pero C positivo, ω pertenece al segundo cuadrante; si B y C son negativos, ω pertenece al tercer cuadrante, y si B es positivo, pero C negativo, ω pertenece al cuarto cuadrante. A efectos de cálculo, es como si se tratara de un rumbo cuadrantal, en el que B indica el componente N (+) o S (-), y C, el E (+) u W (-).

$$B^2 \cdot \sec^2 \omega = B^2 + C^2 \Rightarrow B \cdot \sec \omega = \sqrt{B^2 + C^2}$$

La raíz es positiva, por ser el término $B \cdot \sec \omega$ siempre positivo, ya que: en los cuadrantes de componente N (I y IV), tanto B como $\sec \omega$ son positivos, mientras que en los cuadrantes de componente S (II y III), ambos son negativos.

Así pues,

$$\Delta_{sc} = \sqrt{B^2 + C^2} \cdot \sin(R' + \omega)$$

$$\text{Cuando } R' + \omega = 360, \Delta_{sc} = 0$$

$$\text{Cuando } R' + \omega = 90, \Delta_{sc} = \sqrt{B^2 + C^2}$$

$$\text{Cuando } R' + \omega = 180, \Delta_{sc} = 0$$

$$\text{Cuando } R' + \omega = 270, \Delta_{sc} = -\sqrt{B^2 + C^2}$$

Los desvíos se repiten (con su signo) cada 180° . De aquí, el nombre de semicircular, ya que 180° es la mitad del círculo de la rosa.

DESVÍO CUADRANTAL (Moréu, 1987, pp. 106–107, 197)

El desvío cuadrantal (Δ_c) está formado por los términos de la ecuación aproximada que dependen del doble del rumbo de aguja; es decir:

$$\Delta_c = D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R'$$

Considérese ahora $\tan 2\omega' = \frac{E}{D}$, donde el cuadrante de $2\omega'$ depende de los signos de D, E.

Luego, repitiendo el mismo desarrollo que en el estudio del desvío semicircular, se tiene:

$$\Delta_c = \sqrt{D^2 + E^2} \cdot \sin 2(R' + \omega')$$

$$\text{Cuando } R' + \omega' = 360, \Delta_c = 0$$

$$\text{Cuando } R' + \omega' = 180, \Delta_c = 0$$

$$\text{Cuando } R' + \omega' = 45, \Delta_c = \sqrt{D^2 + E^2}$$

$$\text{Cuando } R' + \omega' = 225, \Delta_c = \sqrt{D^2 + E^2}$$

$$\text{Cuando } R' + \omega' = 90, \Delta_c = 0$$

$$\text{Cuando } R' + \omega' = 270, \Delta_c = 0$$

$$\text{Cuando } R' + \omega' = 135, \Delta_c = -\sqrt{D^2 + E^2}$$

$$\text{Cuando } R' + \omega' = 315, \Delta_c = -\sqrt{D^2 + E^2}$$

En este caso, los desvíos se repiten (con su signo) cada 90° . De aquí, el nombre de cuadrantal. Hay que señalar, además, que el origen del coeficiente E es el mismo que el del coeficiente A, puesto que ambos son causados por las vaillas asimétricas d, b. Por consiguiente, el valor de E suele ser pequeño, de manera que casi todo el desvío cuadrantal se debe al coeficiente D (originado por las varillas simétricas a, e). En consecuencia, el ángulo ω' tiene poco valor, y por tanto, el desvío cuadrantal es máximo a rumbos de aguja próximos a los cuadrantales, y nulo a rumbos próximos a los cardinales.

DESVÍOS SEXTANTAL Y OCTANTAL (Moréu, 1987, p. 107)

Cuando los coeficientes α , ε son grandes, no es aplicable la ecuación aproximada en su forma práctica, ni siquiera la segunda aproximación. Entonces, hay que considerar la siguiente aproximación de la serie de Fourier:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + H \cdot \sin 4R' + K \cdot \cos 4R'$$

Los desvíos sextantal y octantal (Δ_{sx} , Δ_o) son los que dependen del triple y del cuádruplo del rumbo de aguja:

$$\Delta_{sx} = F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' \quad \Delta_o = H \cdot \sin 4R' + K \cdot \cos 4R'$$

Procediendo a un estudio análogo al de los desvíos semicircular y cuadrantal, se obtiene que el sextantal tiene un periodo de 60° (sexta parte del círculo), y el octantal, de 45° (octava parte del círculo).

II.2.4. Clasificación de las fuerzas perturbadoras

Los términos de las fuerzas F_n y F_e se pueden agrupar según el múltiplo del rumbo magnético del que dependen, resultando tres partes en cada una de ellas: la constante, la semicircular y la cuadrantal. Tomando como unidad la fuerza directriz media ($\lambda \cdot H$), se tiene (Moréu, 1987, p.100):

$$F_n = 1 + (\beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \sin R) + (\delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \sin 2R)$$

$$F_e = \alpha + (\beta \cdot \sin R + \gamma \cdot \cos R) + (\delta \cdot \sin 2R + \varepsilon \cdot \cos 2R)$$

FUERZA PRODUCTORA DEL DESVÍO CONSTANTE (Moréu, 1987, pp.100–101)

El coeficiente α da lugar a una fuerza desviadora constante sobre la línea E–Wm.

FUERZA PRODUCTORA DEL DESVÍO SEMICIRCULAR (Moréu, 1987, pp.101–102)

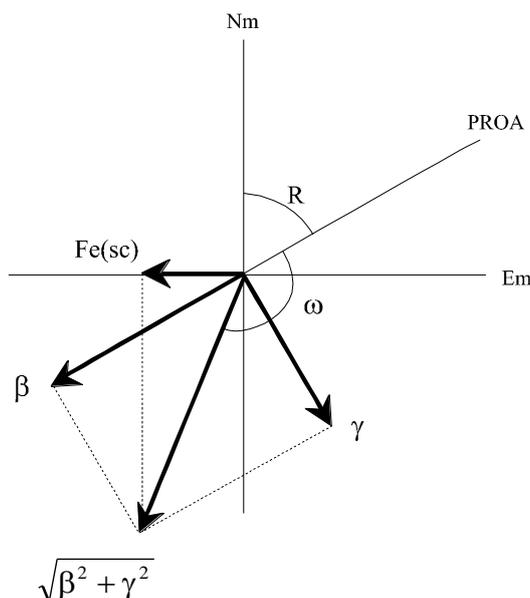


Figura 29. Fuerza productora del desvío semicircular. Ejemplo con un β negativo y un γ positivo. Fuente: Propia.

El coeficiente β está formado por el imán P y la varilla vertical c, hallándose ambos elementos en el plano de crujía. Por tanto, la fuerza correspondiente a β actúa sobre la línea de fe (eje x), en uno u otro sentido. Análogamente, el coeficiente γ , formado por Q y f, conlleva una fuerza sobre el eje y, siendo perpendicular a la de β .

La resultante de ambas fuerzas es $\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}$, de orientación fija dentro del barco, pero variable (con el rumbo) respecto al horizonte, y formando un ángulo orientado con la línea de fe, que viene dado por $\tan \omega = \gamma/\beta$.

Luego, la fuerza productora del desvío semicircular es la proyección de dicha resultante sobre la línea E–Wm, valiendo:

$$Fe(sc) = \beta \cdot \sin R + \gamma \cdot \cos R = \sqrt{\beta^2 + \gamma^2} \cdot \sin(R + \omega)$$

FUERZA PRODUCTORA DEL DESVÍO CUADRANTA (Moréu, 1987, pp.102–103)

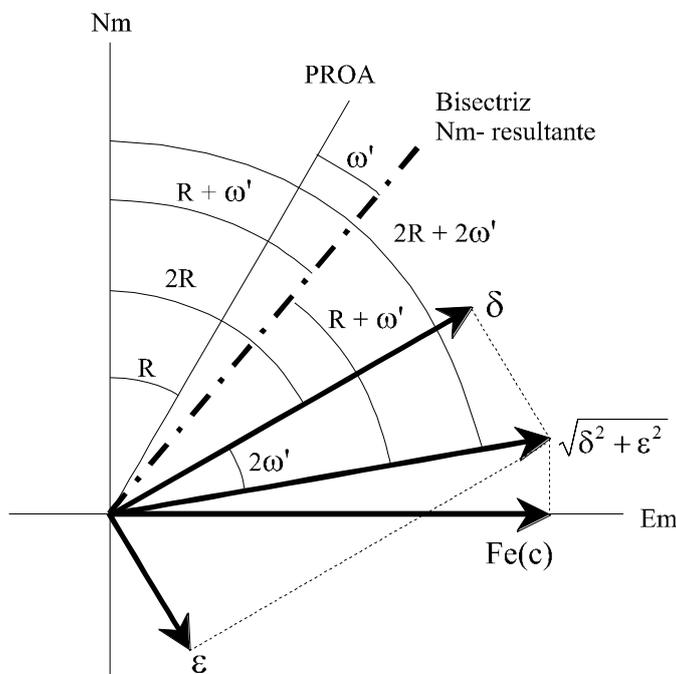


Figura 30. Fuerza productora del desvío cuadrantal. Ejemplo con un δ y un ϵ positivos. Fuente: Propia.

En los coeficientes δ , ϵ , solo intervienen varillas. Asimismo, para que los términos $\delta \cdot \cos 2R$, $\delta \cdot \sin 2R$ (fuerzas directriz y perturbadora debidas a δ) queden respectivamente sobre las líneas N–Sm y E–Wm, la fuerza de δ debe estar sobre la línea que forma un ángulo $2R$ con el meridiano magnético. Análogamente, para que los términos $\epsilon \cdot \cos(2R + 90^\circ) = -\epsilon \cdot \sin 2R$, $\epsilon \cdot \sin(2R + 90^\circ) = \epsilon \cdot \cos 2R$ (fuerzas directriz y perturbadora debidas a ϵ) queden sobre las líneas N–Sm y E–Wm, la fuerza de ϵ debe estar sobre la línea que forma un ángulo $2R$ con la E–Wm.

La resultante de ambas fuerzas es $\sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2}$, la cual forma un ángulo orientado $2\omega'$ con la línea de $2R$, que viene dado por $\tan 2\omega' = \varepsilon/\delta$, y por consiguiente, el ángulo que forma con el Nm es $2R + 2\omega'$.

Luego, la fuerza productora del desvío cuadrantal es la proyección de dicha resultante sobre la línea E–Wm:

$$Fe(c) = \delta \cdot \sin 2R + \varepsilon \cdot \cos 2R = \sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2} \cdot \sin 2(R + \omega')$$

Cuando se cambia el rumbo, varía la dirección de δ respecto a la línea de fe, y con ella, la dirección de la resultante, de modo que esta tiene una orientación variable respecto al horizonte y al barco. Además, el ángulo ω' es el que forma la línea de fe con la bisectriz entre el Nm y la resultante, pues dicha bisectriz equidista $R + \omega'$ del Nm y de la resultante, y por tanto, está separada el ángulo ω' de la línea de fe.

RESUMEN (Propio)

Se nota una clara analogía entre la expresión de la fuerza perturbadora total (Fe) y la fórmula práctica de la ecuación aproximada del desvío:

$$\begin{aligned} Fe &= \alpha + \beta \cdot \sin R + \gamma \cdot \cos R + \delta \cdot \sin 2R + \varepsilon \cdot \cos 2R = \\ &= \alpha + \sqrt{\beta^2 + \gamma^2} \cdot \sin(R + \omega) + \sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2} \cdot \sin 2(R + \omega') \\ \Delta &= A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' = \\ &= A + \sqrt{B^2 + C^2} \cdot \sin(R' + \omega) + \sqrt{D^2 + E^2} \cdot \sin 2(R' + \omega') \end{aligned}$$

Sin embargo, hay dos diferencias: en primer lugar, los términos de la fuerza perturbadora están en función del rumbo magnético, mientras que los desvíos dependen del rumbo de aguja, y en segundo lugar, la expresión de la fuerza perturbadora es exacta, pero la fórmula práctica del desvío es una aproximación, ya que en ella, no se contempla la existencia de otros desvíos como el sextantal y el octantal. La razón de estas diferencias está en que los desvíos no dependen únicamente de la fuerza perturbadora, sino también de la fuerza directriz (Fn), que no es homogénea a todos los rumbos, puesto que los imanes y las varillas también inciden en ella. Reduciendo los desvíos, también se logra que la fuerza directriz sea más parecida a todos los rumbos, y en consecuencia, un mayor grado de exactitud en la fórmula práctica del desvío, así como el hecho de evitar aceleraciones angulares de la aguja. Por tanto, el objetivo de la compensación es doble, aunque se consiga del mismo modo: anular los desvíos, y homogeneizar la fuerza directriz (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 15).

En consecuencia, también conviene analizar las fuerzas directrices, lo cual se hace en el siguiente epígrafe.

II.2.5. Clasificación de las fuerzas directrices y determinación del coeficiente λ

La fuerza directriz también tiene tres partes: la constante, la semicircular y la cuadrantal.

PARTE CONSTANTE

Es la debida al campo magnético terrestre, y por tanto, la principal de las tres.

PARTE SEMICIRCULAR

Es la debida a los imanes P, Q y a las varillas verticales c, f. Aumenta la fuerza directriz a los rumbos de un semicírculo de la rosa, y la disminuye en el otro, habiendo dos rumbos en que su efecto es nulo.

Así como la fuerza productora del desvío semicircular es la proyección de la resultante $\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}$ sobre la línea E-Wm, esta es la proyección de dicha resultante sobre el meridiano magnético:

$$Fn(sc) = \beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \sin R = \sqrt{\beta^2 + \gamma^2} \cdot \cos(R + \omega)$$

Analíticamente, también se demuestra esta igualdad:

$$Fn(sc) = \beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \sin R = \beta \cdot \left(\cos R - \frac{\gamma}{\beta} \cdot \sin R \right) = \beta \cdot (\cos R - \tan \omega \cdot \sin R)$$

$$Fn(sc) = \beta \cdot \frac{\cos R \cdot \cos \omega - \sin R \cdot \sin \omega}{\cos \omega} = \beta \cdot \sec \omega \cdot \cos(R + \omega) = \sqrt{\beta^2 + \gamma^2} \cdot \cos(R + \omega)$$

PARTE CUADRANTAL

Es la debida a las varillas horizontales a, e, d, b. Aumenta la fuerza directriz a los rumbos de dos cuadrantes alternos de la rosa, y la disminuye en los otros dos, habiendo cuatro rumbos en que su efecto es nulo. Asimismo, es la proyección de la resultante $\sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2}$ sobre el meridiano magnético:

$$Fn(c) = \delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \sin 2R = \sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2} \cdot \cos 2(R + \omega')$$

También se puede obtener esta expresión analíticamente, así como las expresiones de las fuerzas perturbadoras.

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE λ (Gaztelu-Iturri, 1999, pp. 50–51)

$$Fn = H' \cdot \cos \Delta \Rightarrow \lambda \cdot H \cdot (1 + \beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \sin R + \delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \sin 2R) = H' \cdot \cos \Delta$$

$$\lambda \cdot (1 + \beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \sin R + \delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \sin 2R) = \frac{H'}{H} \cdot \cos \Delta$$

Pero de acuerdo con el final del epígrafe I.1.7,

$$\frac{H'}{H} = \frac{T^2}{T'^2}$$

Luego,

$$\lambda \cdot (1 + \beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \sin R + \delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \sin 2R) = \frac{T^2}{T^2} \cdot \cos \Delta$$

Particularizando para los cuatro rumbos magnéticos cardinales, se obtiene que:

$$\text{Para } R = N, \quad \lambda \cdot (1 + \beta + \delta) = \frac{T^2}{T_n^2} \cdot \cos \Delta_n$$

$$\text{Para } R = E, \quad \lambda \cdot (1 - \gamma - \delta) = \frac{T^2}{T_e^2} \cdot \cos \Delta_e$$

$$\text{Para } R = S, \quad \lambda \cdot (1 - \beta + \delta) = \frac{T^2}{T_s^2} \cdot \cos \Delta_s$$

$$\text{Para } R = W, \quad \lambda \cdot (1 + \gamma - \delta) = \frac{T^2}{T_w^2} \cdot \cos \Delta_w$$

Sumando,

$$4\lambda = \frac{T^2}{T_n^2} \cdot \cos \Delta_n + \frac{T^2}{T_e^2} \cdot \cos \Delta_e + \frac{T^2}{T_s^2} \cdot \cos \Delta_s + \frac{T^2}{T_w^2} \cdot \cos \Delta_w = \sum_{4 \text{ cardinales}} \frac{T^2}{T^2} \cdot \cos \Delta$$

$$\lambda = \frac{1}{4} \cdot \sum_{4 \text{ cardinales}} \frac{T^2}{T^2} \cdot \cos \Delta$$

Si los desvíos son pequeños, sus cosenos se pueden sustituir por 1, y en consecuencia,

$$\lambda = \frac{1}{4} \cdot \sum_{4 \text{ cardinales}} \frac{T^2}{T^2}$$

II.3. Determinación de los coeficientes aproximados

Particularizando la ecuación aproximada del desvío para los ocho rumbos de aguja principales, resulta que:

$$\Delta_n = A + C + E$$

$$\Delta_e = A + B - E$$

$$\Delta_s = A - C + E$$

$$\Delta_w = A - B - E$$

$$\Delta_{ne} = A + B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707 + D$$

$$\Delta_{se} = A + B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 - D$$

$$\Delta_{sw} = A - B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 + D$$

$$\Delta_{nw} = A - B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707 - D$$

Luego,

$$\Delta_n + \Delta_e + \Delta_s + \Delta_w + \Delta_{ne} + \Delta_{se} + \Delta_{sw} + \Delta_{nw} = \Sigma_8 \Delta = 8A \Rightarrow A = \frac{1}{8} \Sigma_8 \Delta$$

$$\Delta_e - \Delta_w = 2B \Rightarrow B = \frac{1}{2} (\Delta_e - \Delta_w)$$

$$\Delta_n - \Delta_s = 2C \Rightarrow C = \frac{1}{2} (\Delta_n - \Delta_s)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta_{ne} + \Delta_{sw} = 2A + 2D \\ \Delta_{se} + \Delta_{nw} = 2A - 2D \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta_{ne} + \Delta_{sw} - \Delta_{se} - \Delta_{nw} = 4D \Rightarrow D = \frac{1}{4} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw} - \Delta_{se} - \Delta_{nw})$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta_n + \Delta_s = 2A + 2E \\ \Delta_e + \Delta_w = 2A - 2E \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta_n + \Delta_s - \Delta_e - \Delta_w = 4E \Rightarrow E = \frac{1}{4} (\Delta_n + \Delta_s - \Delta_e - \Delta_w)$$

Los valores de estos coeficientes se consideran admisibles hasta 2°. Cuando son superiores, se debe compensar la parte afectada por ellos. (Moréu, 1987, p. 109)

Ejercicio 1 (Moréu, 1987, p. 109): En una aguja compensada, se obtienen los siguientes desvíos:

$$\Delta_n = +0,5 \quad \Delta_{ne} = +3 \quad \Delta_e = +3,5 \quad \Delta_{se} = +2 \quad \Delta_s = -1 \quad \Delta_{sw} = -4 \quad \Delta_w = -3 \quad \Delta_{nw} = -1$$

- i) Hallar los coeficientes aproximados (Moréu, 1987, p. 110).
- ii) Según los valores obtenidos, determinar si la compensación requiere alguna rectificación (propio).
- iii) Calcular el desvío semicircular máximo, así como los rumbos de aguja a los que dicho desvío es máximo y a los que se anula (propio).
- iv) *Idem* para el desvío cuadrantal (propio).

Solución:

i)

$$A = \frac{1}{8} \Sigma_8 \Delta = \frac{1}{8} (0,5 + 3 + 3,5 + 2 - 1 - 4 - 3 - 1) = 0$$

$$B = \frac{1}{2} (\Delta_e - \Delta_w) = \frac{1}{2} (3,5 + 3) = +3,25$$

$$C = \frac{1}{2}(\Delta n - \Delta s) = \frac{1}{2}(0,5 + 1) = +0,75$$

$$D = \frac{1}{4}(\Delta ne + \Delta sw - \Delta se - \Delta nw) = \frac{1}{4}(3 - 4 - 2 + 1) = -0,5$$

$$E = \frac{1}{4}(\Delta n + \Delta s - \Delta e - \Delta w) = \frac{1}{4}(0,5 - 1 - 3,5 + 3) = -0,25$$

ii) Se debe rectificar la compensación en su parte correspondiente al coeficiente B, que por ser mayor que 2, no es admisible.

$$\text{iii) } \tan \omega = \frac{C}{B} = \frac{0,75}{3,25} = 0,231 \Rightarrow \omega = N13E = 013 \text{ (vide Nota al pie 8, p. 53)}$$

$$\Delta_{sc} \max = \sqrt{B^2 + C^2} = B \cdot \sec \omega = 3,25 \cdot 1,026 = 3,33$$

Cuando $R' + \omega = 360$ o 180 , se anula el desvío semicircular:

$$R' + \omega = \begin{cases} 360 \Rightarrow R' = 360 - \omega = 360 - 13 = 347 \\ 180 \Rightarrow R' = 180 - \omega = 180 - 13 = 167 \end{cases}$$

Luego, los rumbos de aguja a los que se anula el desvío semicircular son el 347 y el 167, los cuales son opuestos entre sí.

Cuando $R' + \omega = 90$, el desvío semicircular es máximo y positivo:

$$R' + \omega = 90 \Rightarrow R' = 90 - \omega = 90 - 13 = 77$$

Y cuando $R' + \omega = 270$, dicho desvío es máximo y negativo:

$$R' + \omega = 270 \Rightarrow R' = 270 - \omega = 270 - 13 = 257$$

Por tanto, al 077, el desvío semicircular es de +3,33; y al 257, de -3,33.

Comprobaciones:

$$077 = N77E \quad 167 = S13E \quad 257 = S77W \quad 347 = N13W$$

$$\sin 77 = \cos 13 = 0,974 \quad \cos 77 = \sin 13 = 0,225$$

$$\Delta_{sc}(077) = B \cdot \sin 77 + C \cdot \cos 77 = 3,25 \cdot 0,974 + 0,75 \cdot 0,225 = 3,17 + 0,17 = +3,34$$

$$\Delta_{sc}(167) = B \cdot \sin 167 + C \cdot \cos 167 = 3,25 \cdot 0,225 + 0,75 \cdot (-0,974) = 0,73 - 0,73 = 0$$

$$\Delta_{sc}(257) = B \cdot \sin 257 + C \cdot \cos 257 = 3,25 \cdot (-0,974) + 0,75 \cdot (-0,225) = -3,17 - 0,17 = -3,34$$

$$\Delta_{sc}(347) = B \cdot \sin 347 + C \cdot \cos 347 = 3,25 \cdot (-0,225) + 0,75 \cdot 0,974 = -0,73 + 0,73 = 0$$

Los resultados de 3,34 en lugar de 3,33 se deben a la precisión de los cálculos. En la práctica, este desvío se consideraría de 3,3°, o de 3,5° si se redondea al medio grado.

$$\text{iv) } \tan 2\omega' = \frac{E}{D} = \frac{-0,25}{-0,5} = 0,5 \Rightarrow 2\omega' = S26,5W = 206,5 \Rightarrow \omega' = 103,25 \cong 103$$

$$\Delta_c \max = \sqrt{D^2 + E^2} = D \cdot \sec 2\omega' = -0,5 \cdot (-1,117) = 0,56$$

Cuando $R' + \omega' = 360$, se anula el desvío cuadrantal:

$$R' + \omega' = 360 \Rightarrow R' = 360 - \omega' = 360 - 103 = 257$$

Pero también se anula cada 90°. Luego, los cuatro rumbos de aguja a los que vale cero son:

$$077 \quad 167 \quad 257 \quad 347$$

Asimismo, el desvío cuadrantal es máximo a los intermedios de estos, los cuales son:

$$032 \quad 122 \quad 212 \quad 302$$

Cuando $R' + \omega' = 45$, el desvío cuadrantal es máximo y positivo:

$$R' + \omega' = 45 \Rightarrow 45 - \omega' = 45 - 103 \equiv 360 + 45 - 103 = 302$$

Y puesto que los signos se repiten en los cuadrantes alternos, al 302 y al 122, dicho desvío es de +0,56; mientras que al 032 y al 212 es de -0,56.

Comprobaciones:

R'	32	77	122	167	212	257	302	347
2R'	64	154	244	334	64	154	244	334

Tabla 3. Dobles de los rumbos de aguja (resolución del Ejercicio 1). Fuente: Propia.

$$064 = N64E \quad 154 = S26E \quad 244 = S64W \quad 334 = N26W$$

$$\sin 64 = \cos 26 = 0,899 \quad \cos 64 = \sin 26 = 0,438$$

$$\Delta_{sc}(032) = D \cdot \sin 64 + E \cdot \cos 64 = -0,5 \cdot 0,899 - 0,25 \cdot 0,438 = -0,45 - 0,11 = -0,56$$

$$\Delta_{sc}(077) = D \cdot \sin 154 + E \cdot \cos 154 = -0,5 \cdot 0,438 - 0,25 \cdot (-0,899) = -0,22 + 0,22 = 0$$

$$\Delta_{sc}(122) = D \cdot \sin 244 + E \cdot \cos 244 = -0,5 \cdot (-0,899) - 0,25 \cdot (-0,438) = 0,45 + 0,11 = +0,56$$

$$\Delta_{sc}(167) = D \cdot \sin 334 + E \cdot \cos 334 = -0,5 \cdot (-0,438) - 0,25 \cdot 0,899 = 0,22 - 0,22 = 0$$

$$\Delta_{sc}(212) = D \cdot \sin 64 + E \cdot \cos 64 = \Delta_{sc}(032) = -0,56$$

$$\Delta_{sc}(257) = D \cdot \sin 154 + E \cdot \cos 154 = \Delta_{sc}(0,77) = 0$$

$$\Delta_{sc}(302) = D \cdot \sin 244 + E \cdot \cos 244 = \Delta_{sc}(122) = +0,56$$

$$\Delta_{sc}(347) = D \cdot \sin 334 + E \cdot \cos 334 = \Delta_{sc}(167) = 0$$

Ejercicio 2 (realizado con el desvioscopio⁹ de la Facultad de Náutica de Barcelona en el curso 1997-98): Aproando a cada uno de los ocho rumbos de aguja principales, se toman las siguientes demoras de aguja (D') de un punto alejado y conspicuo de tierra (en el ejercicio, monumento a Colón):

$$D'n = 214 \quad D'ne = 210 \quad D'e = 211 \quad D'se = 224$$

$$D's = 237 \quad D'sw = 246 \quad D'w = 245 \quad D'nw = 229$$

Aplicando la fórmula práctica de la ecuación aproximada del desvío, calcular la demora magnética (Dm) y los coeficientes aproximados. Para el cálculo de la Dm, supóngase que el desvío constante se debe únicamente a una mala alineación de la bitácora, y que por tanto, no incide en las demoras que se han tomado.

⁹ El desvioscopio es un aparato de enseñanza y experimentación diseñado por el capitán inglés George Beall en 1886. Consiste en una plataforma que representa la cubierta de un buque, sobre la cual, está instalada una aguja náutica. El conjunto de la plataforma con la aguja puede girar horizontalmente, a fin de poder señalar cualquier rumbo, y también puede inclinarse para simular escoras. En la plataforma, se pueden colocar imanes y hierros dulces perturbadores, tanto horizontales como verticales, con el objetivo de generar campos magnéticos artificiales. Asimismo, la aguja está provista de imanes correctores (horizontales y verticales), esferas y barra Flinders, para poder compensar los desvíos creados por los campos magnéticos artificiales. Por consiguiente, el aparato permite simular, de manera muy sencilla, toda situación que se pueda dar en la compensación de una aguja náutica, lo cual lo hace muy útil para la docencia. (Gaztelu-Iturri, 1999, pp. 87-89)

Solución:

$$D_m = D' + \Delta \Rightarrow 8D_m = \sum_8 D' + \sum_8 \Delta = \sum_8 D' + 8A \Rightarrow D_m = \frac{1}{8} \sum_8 D' + A$$

Puesto que el coeficiente A se debe a una mala alineación de la bitácora, no afecta a las demoras de aguja. En consecuencia,

$$D_m = \frac{1}{8} \sum_8 D' = \frac{1}{8} (214 + 210 + 211 + 224 + 237 + 246 + 245 + 229) = 227$$

Luego,

$$\begin{aligned} \Delta_n &= D_m - D'_n = 227 - 214 = +13 & \Delta_{ne} &= D_m - D'_{ne} = 227 - 210 = +17 \\ \Delta_e &= D_m - D'_e = 227 - 211 = +16 & \Delta_{se} &= D_m - D'_{se} = 227 - 224 = +3 \\ \Delta_s &= D_m - D'_s = 227 - 237 = -10 & \Delta_{sw} &= D_m - D'_{sw} = 227 - 246 = -19 \\ \Delta_w &= D_m - D'_w = 227 - 245 = -18 & \Delta_{nw} &= D_m - D'_{nw} = 227 - 229 = -2 \end{aligned}$$

Por consiguiente,

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{8} \sum_8 \Delta = \frac{1}{8} (13 + 17 + 16 + 3 - 10 - 19 - 18 - 2) = 0 \\ B &= \frac{1}{2} (\Delta_e - \Delta_w) = \frac{1}{2} (16 + 18) = +17 \\ C &= \frac{1}{2} (\Delta_n - \Delta_s) = \frac{1}{2} (13 + 10) = +11,5 \\ D &= \frac{1}{4} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw} - \Delta_{se} - \Delta_{nw}) = \frac{1}{4} (17 - 19 - 3 + 2) = -0,75 \\ E &= \frac{1}{4} (\Delta_n - \Delta_s - \Delta_e - \Delta_w) = \frac{1}{4} (13 - 10 - 16 + 18) = +1,25 \end{aligned}$$

Ejercicio 3 (propio): Considérese que en el ejercicio anterior, solo se hubiera pasado por la enfilación a los cuatro rumbos cardinales y al NWa. Entonces, se dispondría de los siguientes datos:

$$D'_n = 214 \quad D'_e = 211 \quad D'_s = 237 \quad D'_w = 245 \quad D'_{nw} = 229$$

Calcular con ellos, la D_m y los coeficientes aproximados.

Solución:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_n &= A + C + E \\ \Delta_e &= A + B - E \\ \Delta_s &= A - C + E \\ \Delta_w &= A - B - E \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta_n + \Delta_e + \Delta_s + \Delta_w = 4A \Rightarrow A = \frac{1}{4} (\Delta_n + \Delta_e + \Delta_s + \Delta_w)$$

Asimismo,

$$D_m = D' + \Delta \Rightarrow 4D_m = \sum_4 D' + 4A \Rightarrow D_m = \frac{1}{4} \sum_4 D' + A$$

Considerando que el coeficiente A no incide en las demoras,

$$D_n = \frac{1}{4} \sum_4 D' = \frac{1}{4} (214 + 211 + 237 + 245) = 226,75 \cong 227$$

Luego, se obtienen los siguientes desvíos:

$$\Delta_n = +13 \quad \Delta_e = +16 \quad \Delta_s = -10 \quad \Delta_w = -18 \quad \Delta_{nw} = -2$$

Con los cardinales, se calculan los coeficientes A, B, C, E:

$$A = \frac{1}{4}(\Delta n + \Delta e + \Delta s + \Delta w) = \frac{1}{4}(13 + 16 - 10 - 18) = +0,25$$

$$B = \frac{1}{2}(\Delta e - \Delta w) = \frac{1}{2}(16 + 18) = +17$$

$$C = \frac{1}{2}(\Delta n - \Delta s) = \frac{1}{2}(13 + 10) = +11,5$$

$$E = \frac{1}{4}(\Delta n + \Delta s - \Delta e - \Delta w) = \frac{1}{4}(13 - 10 - 16 + 18) = +1,25$$

Al haber redondeado la Dm, aparece este coeficiente A.

Finalmente, mediante la expresión del desvío al NW, se halla el coeficiente D:

$$\Delta nw = A - B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707 - D \Rightarrow D = A - B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707 - \Delta nw$$

$$D = 0,25 - 17 \cdot 0,707 + 11,5 \cdot 0,707 + 2 = -1,64$$

La diferencia con el valor del Ejercicio 2 se debe a que: en aquel, se determinó D a partir de los cuatro desvíos cuadrantales; mientras que en este, se ha calculado con un cuadrantal, e indirectamente, con los cuatro cardinales, de forma que la incidencia de los desvíos sextantal y octantal no se refleja del mismo modo.

Ejercicio 4 (propio): Con los coeficientes obtenidos en el Ejercicio 2, calcular los desvíos a los ocho rumbos de aguja principales.

Solución:

Teniendo en cuenta que A = 0,

$$\Delta n = C + E = 11,5 + 1,25 = 12,75$$

$$\Delta ne = B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707 + D = 17 \cdot 0,707 + 11,5 \cdot 0,707 - 0,75 = +19,4$$

$$\Delta e = B - E = 17 - 1,25 = +15,75$$

$$\Delta se = B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 - D = 17 \cdot 0,707 - 11,5 \cdot 0,707 + 0,75 = +4,64$$

$$\Delta s = -C + E = 11,5 + 1,25 = -10,25$$

$$\Delta sw = -B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 + D = -17 \cdot 0,707 - 11,5 \cdot 0,707 - 0,75 = -20,9$$

$$\Delta w = -B - E = -17 - 1,25 = -18,25$$

$$\Delta nw = -B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707 - D = -17 \cdot 0,707 + 11,5 \cdot 0,707 + 0,75 = -3,14$$

Las diferencias con los desvíos obtenidos a partir de las demoras, se deben a que no se han considerado los desvíos sextantal y octantal.

. . .

Cuando se tienen en cuenta los desvíos sextantal y octantal, se considera la siguiente ecuación aproximada del desvío:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + H \cdot \sin 4R' + K \cdot \cos 4R'$$

Particularizando para los ocho rumbos de aguja principales, se tiene:

R'	0	45	90	135	180	225	270	315
2R'	0	90	180	270	0	90	180	270
3R'	0	135	270	45	180	315	90	225
4R'	0	180	0	180	0	180	0	180

Tabla 4. Múltiplos de los ocho rumbos principales. Fuente: Propia.

$$\Delta n = A + C + E + G + K$$

$$\Delta e = A + B - E - F + K$$

$$\Delta s = A - C + E - G + K$$

$$\Delta w = A - B - E + F + K$$

$$\Delta ne = A + B \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + C \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta se = A + B \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - C \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta sw = A - B \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - C \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta nw = A - B \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + C \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta n - \Delta s = 2C + 2G \quad (\text{i}) \\ \Delta n + \Delta s = 2A + 2E + 2K \\ \Delta e - \Delta s = 2B - 2F \quad (\text{ii}) \\ \Delta e + \Delta w = 2A - 2E + 2K \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \Delta n + \Delta s - \Delta e - \Delta w = 4E \Rightarrow E = \frac{1}{4}(\Delta n + \Delta s - \Delta e - \Delta w) \\ \Delta n + \Delta s + \Delta e + \Delta w = 4A + 4K \quad (\text{iii}) \end{cases}$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta ne + \Delta sw = 2A + 2D - 2K \\ \Delta ne - \Delta sw = B \cdot \sqrt{2} + C \cdot \sqrt{2} + F \cdot \sqrt{2} - G \cdot \sqrt{2} \quad (\text{iv}) \\ \Delta se + \Delta nw = 2A - 2D - 2K \\ \Delta se - \Delta nw = B \cdot \sqrt{2} - C \cdot \sqrt{2} + F \cdot \sqrt{2} + G \cdot \sqrt{2} \quad (\text{v}) \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \Delta ne + \Delta sw - \Delta se - \Delta nw = 4D \Rightarrow \\ D = \frac{1}{4}(\Delta ne + \Delta sw - \Delta se - \Delta nw) \\ \Delta ne + \Delta sw + \Delta se + \Delta nw = 4A - 4K \quad (\text{vi}) \end{cases}$$

$$(\text{iii}) + (\text{vi}) \Rightarrow \Delta n + \Delta s + \Delta e + \Delta w + \Delta ne + \Delta sw + \Delta se + \Delta nw = 8A \Rightarrow A = \frac{1}{8} \sum_8 \Delta$$

$$(\text{iii}) - (\text{vi}) \Rightarrow \Delta n + \Delta s + \Delta e + \Delta w - \Delta ne - \Delta sw - \Delta se - \Delta nw = 8K$$

$$K = \frac{1}{8} (\Delta n + \Delta e + \Delta s + \Delta w - \Delta ne - \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) = \frac{1}{8} (\sum_4 \Delta_{\text{cardinales}} - \sum_4 \Delta_{\text{cuadrantales}})$$

$$(\text{iv}) + (\text{v}) \Rightarrow \Delta ne - \Delta sw + \Delta se - \Delta nw = 2B \cdot \sqrt{2} + 2F \cdot \sqrt{2} \quad (\text{vii})$$

$$(\text{iv}) - (\text{v}) \Rightarrow \Delta ne - \Delta sw - \Delta se + \Delta nw = 2C \cdot \sqrt{2} - 2G \cdot \sqrt{2} \quad (\text{viii})$$

$$\sqrt{2} \cdot (\text{i}) + (\text{viii}) \Rightarrow \sqrt{2} \cdot (\Delta n - \Delta s) + \Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw = 4C \cdot \sqrt{2}$$

$$\sqrt{2} \cdot (\text{i}) - (\text{viii}) \Rightarrow \sqrt{2} \cdot (\Delta n - \Delta s) - \Delta ne - \Delta nw + \Delta se + \Delta sw = 4G \cdot \sqrt{2}$$

$$\sqrt{2} \cdot (\text{ii}) + (\text{vii}) \Rightarrow \sqrt{2} \cdot (\Delta e - \Delta w) + \Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw = 4B \cdot \sqrt{2}$$

$$(\text{vii}) - \sqrt{2} \cdot (\text{ii}) \Rightarrow \sqrt{2} \cdot (\Delta w - \Delta e) + \Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw = 4F \cdot \sqrt{2}$$

Luego,

$$C = \frac{1}{4} \left[\Delta n - \Delta s + (\Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right]$$

$$G = \frac{1}{4} \left[\Delta n - \Delta s - (\Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right]$$

$$B = \frac{1}{4} \left[\Delta e - \Delta w + (\Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right]$$

$$F = \frac{1}{4} \left[\Delta w - \Delta e + (\Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right]$$

En resumen:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{8} \sum_8 \Delta & B &= \frac{1}{4} [\Delta e - \Delta w + (\Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) \cdot 0,707] \\
 D &= \frac{1}{4} (\Delta ne + \Delta sw - \Delta se - \Delta nw) & C &= \frac{1}{4} [\Delta n - \Delta s + (\Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw) \cdot 0,707] \\
 E &= \frac{1}{4} (\Delta n + \Delta s - \Delta e - \Delta w) & F &= \frac{1}{4} [\Delta w - \Delta e + (\Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) \cdot 0,707] \\
 K &= \frac{1}{8} (\sum_4 \Delta_{\text{cardinales}} - \sum_4 \Delta_{\text{cuadrantales}}) & G &= \frac{1}{4} [\Delta n - \Delta s - (\Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw) \cdot 0,707]
 \end{aligned}$$

Los valores de F, G, K son admisibles hasta 0,5° (Moréu, 1987, p. 110). Asimismo, se observa que los coeficientes A, D, E se mantienen iguales, pero no los B, C, en los que se reflejan los valores de F, G. Además, no aparece el coeficiente H, ya que el término $H \cdot \sin 4R'$ es nulo a todos los rumbos considerados, y aparte, para nueve incógnitas son necesarias nueve ecuaciones, y solo se han planteado ocho.

Ejercicio 5 (propio): Con los desvíos obtenidos en el Ejercicio 2, calcular los coeficientes A, ..., K.

Solución:

$$\Delta n = +13 \quad \Delta ne = +17 \quad \Delta e = +16 \quad \Delta se = +3 \quad \Delta s = -10 \quad \Delta sw = -19 \quad \Delta w = -18 \quad \Delta nw = -2$$

Los coeficientes A, D, E son los mismos que los del Ejercicio 2:

$$A = 0 \quad D = -0,75 \quad E = +1,25$$

Los demás se calculan mediante las fórmulas:

$$K = \frac{1}{8} (\sum_4 \Delta_{\text{cardinales}} - \sum_4 \Delta_{\text{cuadrantales}}) = \frac{1}{8} (13 + 16 - 10 - 18 - 17 - 3 + 19 + 2) = +0,25$$

En las expresiones de B, F, interviene el término $(\Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) \cdot 0,707$:

$$(\Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) \cdot 0,707 = (17 + 3 + 19 + 2) \cdot 0,707 = 28,99$$

Y en las de C, G, $(\Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw) \cdot 0,707$:

$$(\Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw) \cdot 0,707 = (17 - 2 - 3 + 19) \cdot 0,707 = 21,92$$

Luego,

$$B = \frac{1}{4} [\Delta e - \Delta w + (\Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) \cdot 0,707] = \frac{1}{4} (16 + 18 + 28,99) = +15,75$$

$$C = \frac{1}{4} [\Delta n - \Delta s + (\Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw) \cdot 0,707] = \frac{1}{4} (13 + 10 + 21,92) = +11,23$$

$$F = \frac{1}{4} [\Delta w - \Delta e + (\Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) \cdot 0,707] = \frac{1}{4} (-18 - 16 + 28,99) = -1,25$$

$$G = \frac{1}{4} [\Delta n - \Delta s - (\Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw) \cdot 0,707] = \frac{1}{4} (13 + 10 - 21,92) = +0,27$$

Ejercicio 6 (propio): Con los coeficientes obtenidos en el Ejercicio 5, calcular los desvíos a los siguientes rumbos de aguja: N, NE, E.

Solución:

Teniendo en cuenta que $A = 0$,

$$\Delta n = C + E + G + K = 11,23 + 1,25 + 0,27 + 0,25 = +13$$

$$\Delta ne = B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707 + D + F \cdot 0,707 - G \cdot 0,707 - K$$

$$\Delta ne = 15,75 \cdot 0,707 + 11,23 \cdot 0,707 - 0,75 - 1,25 \cdot 0,707 - 0,27 \cdot 0,707 - 0,25 = +17$$

$$\Delta e = B - E - F + K = 15,75 - 1,25 + 1,25 + 0,25 = +16$$

Al considerar los coeficientes F, G, K, los desvíos calculados mediante los coeficientes, coinciden con los obtenidos a partir de las demoras. Se puede comprobar esta coincidencia a los otros cinco rumbos.

Las ocho comprobaciones son la verificación de las ocho ecuaciones del desvío que se han planteado con las ocho incógnitas halladas (los coeficientes A,...,K). Sin embargo, cuando se plantean ocho ecuaciones, pero con solo cinco incógnitas (los coeficientes A,...,E), no está garantizado que haya unos determinados valores de las cinco incógnitas que satisfagan las ocho ecuaciones.

Ejercicio 7 (propio): A partir de los desvíos obtenidos en el Ejercicio 2, calcular el desvío al rumbo de aguja 300, considerando los desvíos sextantal y octantal.

Solución:

$$\Delta(300) = A + B \cdot \sin 300 + C \cdot \cos 300 + D \cdot \sin 240 + E \cdot \cos 240 + F \cdot \sin 180 + G \cdot \cos 180 + H \cdot \sin 120 + K \cdot \cos 120$$

Los coeficientes A,...,K se han hallado en el Ejercicio 5, pero se desconoce el H. No obstante, si se obvia el sumando que depende de H, se obtiene un desvío calculado más parecido al real que si solo se consideran los coeficientes A,...,E. En consecuencia, y teniendo en cuenta que $A = 0$, $\sin 180 = 0$ y $\cos 180 = -1$, resulta que:

$$\begin{aligned} \Delta(300) &= B \cdot \sin 300 + C \cdot \cos 300 + D \cdot \sin 240 + E \cdot \cos 240 - G + K \cdot \cos 120 \\ \Delta(300) &= 15,75 \cdot (-0,866) + 11,23 \cdot 0,5 - 0,75 \cdot (-0,866) + 1,25 \cdot (-0,5) - 0,27 + 0,25 \cdot (-0,5) = -8,4 \end{aligned}$$

Ejercicio 8 (propio): Confeccionar una hoja de cálculo en la que: introduciendo los desvíos a los ocho rumbos de aguja principales, dé los desvíos a los rumbos de aguja múltiplos de 15° (N, 015, 030,...).

Solución:

Basta con: en ocho casillas, introducir los desvíos obtenidos a los ocho rumbos principales; en ocho casillas más, introducir la fórmula de cada uno de los coeficientes A,..., K; en veinticuatro casillas, introducir los distintos rumbos de aguja (0, 15, 30,...), y finalmente, en veinticuatro casillas al lado (o debajo) de estas, introducir la fórmula de la ecuación aproximada del desvío, particularizada para que el rumbo de aguja sea la casilla adyacente. Con los desvíos del Ejercicio 1, se obtienen los siguientes valores:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
2	0,5	3	3,5	2	-1	-4	-3	-1
3								
4	A	B	C	D	E	F	G	K
5	0	3,39	1,08	-0,5	-0,25	0,14	-0,33	0
6								
7	R'	Δ	R'	Δ	R'	Δ	R'	Δ
8	0	0,5	90	3,5	180	-1	270	-3
9	15	1,3	105	3,1	195	-2,3	285	-2,2
10	30	2,2	120	2,6	210	-3,3	300	-1,5
11	45	3	135	2	225	-4	315	-1
12	60	3,5	150	1,2	240	-4,1	330	-0,6
13	75	3,7	165	0,2	255	-3,7	345	-0,1

Tabla 5. Hoja de cálculo (resolución del Ejercicio 8). Fuente: Propia.

$$B5=REDONDEAR(1/4*(C2-G2+(B2+D2-F2-H2)*0,707);2^{10})$$

$$D10=REDONDEAR(\$A\$5^{11}+\$B\$5*SENO(RADIANES^{12}(C10))+\$C\$5*COS(RADIANES(C10))+\$D\$5*SENO(RADIANES(2*C10))+\$E\$5*COS(RADIANES(2*C10))+\$F\$5*SENO(RADIANES(3*C10))+\$G\$5*COS(RADIANES(3*C10))+\$H\$5*COS(RADIANES(4*C10)));1)$$

Ejercicio 9 (propio): En la hoja de cálculo del Ejercicio 8, insertar la curva de los desvíos.

Solución:

Se selecciona el tipo de gráfica deseada, y una vez en ella, se seleccionan las casillas A1–H2, que corresponden a los rumbos de aguja (Fila 1) y a sus desvíos (Fila 2). Las casillas de la Fila 1 serán las abscisas, y las de la Fila 2, las ordenadas. De acuerdo con esto, previamente conviene añadir una novena columna, correspondiente al desvío al N, a fin de que la curva no termine al NW, sino al N. Fialmente, se llevan a cabo los retoques que se deseen en el formato de la gráfica.

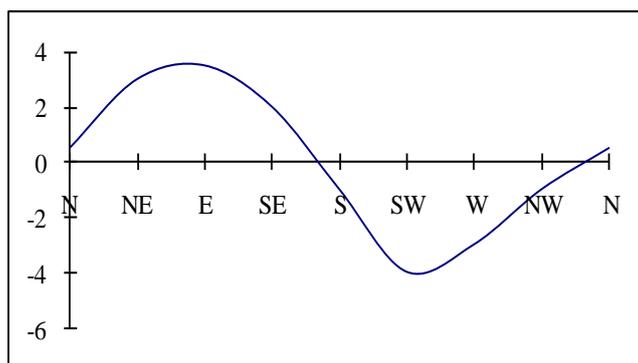


Figura 31. Curva de los desvíos (resolución del Ejercicio 8). Fuente: Propia.

¹⁰ La función REDONDEAR(operación;n) da el valor de la operación con n decimales.

¹¹ La diferencia entre A5 y \$A\$5 es que: al arrastrar la fórmula que contiene A5 para copiarla en varias casillas, en el primer caso, A5 cambia. Esto es: si se copia la fórmula en una casilla inferior, A5 cambia a A6, y si se copia en la casilla de la derecha, A5 cambia a B5. Por el contrario, aunque se copie la fórmula en varias casillas, la casilla A5 permanece constante si se ha introducido en la fórmula como \$A\$5.

¹² La función RADIANES(n) convierte n grados sexagesimales en radianes. Esta función hay que aplicarla porque las funciones trigonométricas (SENO, COS, etc.) utilizan radianes en lugar de grados.

II.4. Compensación preliminar

II.4.1. Introducción

Cada tipo de hierro se debe compensar con uno de sus mismas características: los duros con imanes, y los dulces con varillas. La compensación preliminar consiste en anular (o reducir todo lo posible) el desvío cuadrantal con varillas, y el semicircular, con imanes. El cuadrantal queda debidamente corregido, pero no el semicircular, que depende, tanto de los imanes P, Q, como de las varillas verticales c, f. No obstante, esta compensación resulta suficiente en muchos casos, debiéndose rectificar en otra latitud magnética cuando no sea así. Con la compensación preliminar y su rectificación, se logra una compensación exacta, más comúnmente llamada definitiva. En este capítulo, se estudiará la preliminar.

II.4.2. Imanes longitudinales y transversales

En general, los imanes correctores del desvío semicircular son cilíndricos, y de longitudes comprendidas entre 5 y 22,5 cm, según el modelo de bitácora. Para cada tipo, los hay grandes y pequeños. Los primeros tienen 1 cm de diámetro, y los segundos, 0,5 cm. Para una misma longitud, la potencia de los pequeños es un cuarto de la de los grandes. Normalmente, los imanes suelen ser de acero con tungsteno o con cobalto. En ambos casos, van pintados: una mitad de azul y otra de rojo, según la polaridad. Pero además, los de cobalto llevan una franja gris en el medio. Esta marca sirve para distinguirlos de los de tungsteno, con el fin de que no se utilicen ni se guarden juntos, pues los de cobalto, de mayor coercitividad, desmagnetizarían lentamente los de tungsteno.

Estos imanes se alojan en unos orificios del macizo de la bitácora, llamados casillas o casilleros, los cuales están situados a distintos niveles. Hay casillas longitudinales (en la dirección de proa a popa) y transversales (de babor a estribor). Las longitudinales tienen dos orificios, uno a cada lado del plano de crujía, paralelos al mismo, y simétricos respecto al centro de la aguja. Las transversales, por el contrario, constan de un solo orificio en la dirección del través, a popa del centro de la rosa, y con su punto medio en crujía. En algunos modelos de bitácora, no hay casillas, sino que los imanes están alojados en unos soportes longitudinales y transversales que se pueden regular en altura.

Los imanes no se deben colocar muy cerca de la aguja, a fin de reducir su efecto inductor sobre los correctores de hierro dulce (esferas y barra Flinders). A tal efecto, la distancia mínima desde el centro de la rosa hasta el imán más próximo a ella, se estima en el doble de la longitud del imán, siendo recomendable emplear un mayor número de correctores alejados, que pocos y cerca.

Cuando se dispone de casillas, estas suelen tener una numeración, que puede ser convencional, o referirse al desvío que anula una pareja de imanes grandes en Glasgow. En este último caso, un desvío al E/Wa de n grados en Glasgow, se corrige con una pareja de imanes grandes en la casilla longitudinal n .

(Moréu, 1987, pp. 163–164)

II.4.3. Potencias absoluta y relativa

Según el desvío que anula un par de imanes grandes en Glasgow, al E/Wa, las casillas longitudinales de una bitácora, de abajo a arriba, son (Moréu, 1987, p. 164):

6 7 8 9 10 11 12 14 16 18 20

Las transversales se encuentran a la misma altura que las longitudinales, y tienen su misma numeración, aunque un solo imán grande en la casilla n , anula un desvío en Glasgow, al N/Sa, de $\frac{1}{2}n$ grados.

En un lugar de componente H , navegando al N/Sa, un imán grande en la casilla transversal n , anula un desvío tal que:

$$\sin \Delta = \frac{F_e}{H'} \quad \cos \Delta = \frac{F_n}{H'}$$

Considerando $\sin \Delta = \Delta \cdot \sin 1^\circ$ y $\cos \Delta = 1$, por ser Δ un ángulo pequeño, resulta que:

$$\frac{\sin \Delta}{\cos \Delta} = \frac{\Delta \cdot \sin 1^\circ}{1} = \frac{F_e}{F_n} \Rightarrow \Delta = \frac{F_e}{F_n} \cdot \csc 1^\circ$$

Y tomando para el N/Sa, la F_n del N/Sm, se tiene:

$$\Delta = \frac{F_e \cdot \csc 1^\circ}{\lambda \cdot H \cdot (1 \pm \beta + \delta)} \quad (i)$$

Asimismo, se define la potencia absoluta (P_a) como el desvío que anula un imán grande en el casillero 1 (suponiendo su existencina) en un lugar de $H = 1$ unidad Gauss. Luego,

$$P_a = \frac{F_e' \cdot \csc 1^\circ}{\lambda \cdot (1 \pm \beta + \delta)}$$

donde F_e' es la fuerza perturbadora que anula el imán cuando está en la casilla 1, la cual, debido al diseño de la bitácora, es n veces menor que F_e , o sea: $F_e/F_e' = n$

En otro lugar de componente H , el mismo imán situado en la casilla 1, anulará un desvío distinto, el cual toma el nombre de potencia relativa (P_r):

$$P_r = \frac{F_e' \cdot \csc 1^\circ}{\lambda \cdot H \cdot (1 \pm \beta + \delta)} \quad (ii)$$

Por consiguiente,

$$\frac{Pa}{Pr} = \frac{\frac{Fe' \cdot csc1^\circ}{\lambda \cdot (1 \pm \beta + \delta)}}{Fe' \cdot csc1^\circ} = H \Rightarrow Pa = Pr \cdot H \quad (iii)$$

Particularizando esta expresión para dos lugares de intensidades H_1, H_2 , se obtiene que:

$$\left. \begin{aligned} Pa &= Pr_1 \cdot H_1 \\ Pa &= Pr_2 \cdot H_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Pr_1 \cdot H_1 = Pr_2 \cdot H_2 \quad (iv)$$

Y dividiendo (i) entre (ii), resulta:

$$\frac{\Delta}{Pr} = \frac{\frac{Fe \cdot csc1^\circ}{\lambda \cdot H \cdot (1 \pm \beta + \delta)}}{\frac{Fe' \cdot csc1^\circ}{\lambda \cdot H \cdot (1 \pm \beta + \delta)}} = \frac{Fe}{Fe'}$$

Pero la relación entre Fe y Fe' es n, con lo cual,

$$n = \frac{\Delta}{Pr}$$

Para los imanes longitudinales, el desarrollo es análogo, aunque al E/W, $F_n = \lambda \cdot H \cdot (1 \mp \gamma - \delta)$

. . .

La parte del desvío semicircular que anulan los imanes longitudinales es el coeficiente B, y la que anulan los transversales, el C. Por tanto, una vez determinados estos coeficientes, y teniendo en cuenta que a los imanes longitudinales, por ir en pareja, hay que aplicarles el doble de la potencia relativa, la casilla en la que deben colocarse es:

$$\text{los longitudinales en la } n = \frac{B}{2Pr} \quad \text{y} \quad \text{los transversales en la } n = \frac{C}{Pr}$$

Es importante señalar que siempre se entiende que los imanes son grandes, excepto si se especifica que se trata de pequeños.

Asimismo, un coeficiente B positivo corresponde a un imán P positivo (sin considerar la varilla c), y puesto que dicho imán tiene su polo S o azul a proa, los imanes correctores se deben colocar con sus polos N o rojos a proa. Por el contrario, un B negativo corresponde a un P negativo, que tiene su polo S o azul a popa, de modo que los imanes correctores se deben colocar con sus polaridades rojas a popa. Análogamente, si C es positivo, el imán corrector tiene que ir con la polaridad roja a estribor; mientras que si C es negativo, debe tener el rojo a babor.

Ejercicio 10 (Moréu, 1987, p. 167): Se pretende anular un $C = +2^\circ$. Determinar la casilla transversal en la que se debe alojar un imán, siendo $Pr = 0,2$.

Solución:

$$n = \frac{C}{Pr} = \frac{2}{0,2} = 10, \text{ rojo a estribor}$$

Ejercicio 11 (Moréu, 1987, p. 167): Se pretende anular un $B = -2^\circ$. Determinar la casilla longitudinal en la que se debe alojar una pareja de imanes, siendo $Pr = 0,2$.

Solución:

$$n = \frac{B}{2Pr} = \frac{2}{0,4} = 5, \text{ rojos a popa}$$

Puesto que la casilla 5 no existe, se colocará una pareja de imanes pequeños en la 20:

$$n = \frac{B}{2\left(\frac{1}{4}Pr\right)} = \frac{2}{2 \cdot \frac{1}{4} \cdot 0,2} = \frac{2}{0,1} = 20, \text{ rojos a popa}$$

En Glasgow, donde $H = 0,9$ unidades Gauss (Moréu, 1987, p. 165), un par de imanes en el casillero longitudinal 1, anula un desvío al E/Wa de 1° . Luego, la potencia relativa en Glasgow (Pr_G) es de 0,5. En otro lugar, según la igualdad (iv) de la p. 73, es:

$$Pr = \frac{Pr_G \cdot H_G}{H} = \frac{0,5 \cdot 0,9}{H} = \frac{0,45}{H}$$

Si H está expresada en unidades del SI (μT),

$$Pr = \frac{0,45 \text{ unidad Gauss} \cdot 18,5 \mu T / \text{unidad Gauss}}{H \mu T} = \frac{8,325}{H}$$

Otra manera de calcular la potencia relativa, consiste en introducir un imán en una casilla transversal cualquiera, con el barco proa al N/Sa, y observar el desvío que provoca. De esta forma,

$$Pr = \frac{\Delta}{n}$$

COMENTARIO (Propio)

La potencia relativa depende del componente H del lugar, ya que: de acuerdo con la igualdad (iii) de la p. 73, $Pr = 0,45/H$, siendo el factor 0,45 la potencia absoluta. Sin embargo, el estado magnético de los imanes suele variar con el tiempo, resultando que: en Glasgow (al E/Wa) una pareja de imanes en el casillero longitudinal 1, no produce un desvío de 1° , con lo cual, la potencia relativa en Glasgow no es de 0,5; ni la potencia absoluta, de $0,5 \cdot 0,9 = 0,45$.

Si el estado magnético de los imanes ha cambiado, y se determina la potencia relativa a partir del desvío que produce un imán en la casilla transversal n (al N/Sa), se obtiene otra potencia relativa, distinta a la calculada mediante el valor de H , pero que es la que hay que considerar para calcular la casilla en la que se deben alojar los imanes. En definitiva: si bien teóricamente,

la potencia relativa solo depende del lugar, en la práctica, depende del lugar y de los imanes concretos con los que se lleva a cabo la compensación, correspondiéndose los valores teórico y real únicamente si el estado magnético de los imanes no se ha alterado desde su fabricación.

Asimismo, el profesor Arribalzaga propone sustituir el uso de la potencia relativa de los imanes por el de su momento magnético, lo cual hizo en su tesis doctoral (Arribalzaga, 2016, pp. 139, 140, 210).

II.4.4. Métodos para compensar el desvío semicircular

Una forma de compensar el desvío semicircular, consiste en:

1º, obtener los desvíos a los cuatro rumbos de aguja cardinales, y determinar con ellos, los coeficientes B, C, y

2º, anular dichos coeficientes, pudiéndose dar dos casos:

i) Que la bitácora disponga de casillas y que su numeración esté referida a los desvíos que anulan los imanes. En este caso, basta con calcular las casillas en las que se deben colocar los imanes, tal como se ha hecho en los Ejercicios 10 y 11.

ii) Que la bitácora no disponga de casillas o que su numeración no esté referida a los desvíos que anulan los imanes. En este caso, se debe arrumbar de nuevo al Nm o al Sm para anular el coeficiente C, y al Em o al Wm para anular el B.

Actualmente, la forma más sencilla de aproar a un rumbo magnético (R) es con el compás giroscópico. Para ello, se determina la corrección de dicho compás (Cg), que es constante a todos los rumbos. Luego, $R_g = R_v - C_g$, donde $R_v = R + dm$, y por tanto, $R_g = R + dm - C_g$. Si no se dispone de compás giroscópico, hay que arrumbar a una enfilación N–Sm y a otra al E–Wm. De hecho, no es necesario que las enfilaciones coincidan exactamente con estas demoras magnéticas; basta con que sean próximas a ellas. En cualquier caso, mientras el timonel, con independencia del compás magnético, mantiene el N/Sm (u otro rumbo próximo), se va tanteando la posición de un imán transversal (o de varios) hasta conseguir que el rumbo de aguja se altere C grados, teniendo en cuenta que la polaridad roja del imán debe ir a estribor si C es positivo, y a babor si C es negativo. Análogamente, al E/Wm (o a otro rumbo próximo) se busca la posición de una pareja de imanes longitudinales (o de varias) para que el rumbo de aguja se mueva B grados, de forma que la polaridad roja de los imanes debe ir a proa si B es positivo, y a popa si B es negativo .

Obsérvese que: si se pueden calcular las casillas, el desvío semicircular se compensa con cuatro rumbos, pero si no es así, se requieren seis: cuatro para determinar los desvíos y dos para compensar.

No obstante, el método que se suele emplear para compensar, es el siguiente (Moréu, 1987, pp.182–184):

Se aproa al Em (o al Wm), y se anula todo el desvío, tanteando la posición de los imanes longitudinales hasta que el rumbo de aguja indique el E: $R' = E$ (o $R' = W$). Si se sigue una enfilación cuya demora magnética (Dm) no es exactamente la Em (o la Wm), el desvío se anula haciendo que $R' = Dm$.

También se puede calcular el número de casilla:

$$n = \frac{\Delta e, w}{2Pr} = \frac{R - R'}{2Pr}$$

En cualquier caso, el coeficiente B no se habrá anulado, sino alterado, resultando que:

$$\Delta e = 0 = A + B' - E$$

A continuación, se aproa al Wm (o al Em), donde:

$$\Delta w = A - B' - E$$

Luego,

$$\Delta e - \Delta w = -\Delta w = 2B' \Rightarrow B' = -\frac{1}{2} \Delta w$$

Por tanto, para anular el coeficiente B', solo hay que anular la mitad del Δw (o del Δe).

Análogamente, se aproa al Nm (o al Sm) y se anula todo el Δn (o el Δs) con imanes transversales, anulando después la mitad del Δs (o del Δn).

Por razones prácticas, tras aproar al primer rumbo cardinal, no se va a su opuesto, sino a otro distante 90° . Así por ejemplo, el orden del borneo podría ser: Em, Sm, Wm, Nm.

Ejercicio 12 (propio): Sin ningún imán en la bitácora, se procede a efectuar una compensación preliminar del desvío semicircular, en un lugar de $Pr = 0,5$. El buque bornea a los cuatro rumbos cardinales, anulando los desvíos (o la mitad) a medida que van apareciendo. El orden de los rumbos es N, E, S, W, obteniendo los siguientes desvíos:

$$\Delta n = +9 \quad \Delta e = -16 \quad \Delta s = +2 \quad \Delta w = +6$$

Determinar la posición definitiva de los imanes longitudinales y transversales, tomando como referencia las casillas según los desvíos en Glasgow.

Solución:

El desvío al N se anula colocando un imán transversal (IT) en la siguiente casilla:

$$n = \frac{\Delta n}{Pr} = \frac{9}{0,5} = 18$$

Al anular todo el Δn con un imán (o varios), se supone que: $\Delta n = C$, con lo cual, C tiene el signo del Δn . Por tanto, en este caso, la polaridad roja va a estribor.

Si se anulara el Δs , resultaría que $\Delta s = -C$, de modo que: si el Δs fuera positivo, el rojo iría a babor, y si fuera negativo, a estribor. Ocurre lo mismo con los desvíos al E/W.

Al Em, se coloca una pareja de imanes longitudinales (ILs) en la siguiente casilla:

$$n = \frac{\Delta e}{2Pr} = \frac{16}{1} = 16, \text{ rojos a popa}$$

Al Sm,

$$n = \frac{\frac{1}{2}\Delta s}{Pr} = \frac{1}{0,5} = 2, \text{ rojo a babor}$$

Pero al Nm, se alojó un IT en la casilla 18, con el rojo a estribor. Luego, la posición definitiva de este IT debe ser en la casilla 16, con el rojo a estribor.

Al Wm,

$$n = \frac{\frac{1}{2}\Delta w}{2Pr} = \frac{3}{1} = 3, \text{ rojos a popa}$$

En este caso, la pareja de ILs de la casilla 16 se subirían a la 19, manteniendo los rojos a popa. Pero la casilla 19 no existe, de forma que hay que buscar una combinación de casillas equivalente a esta, por ejemplo la 10 y la 9. En consecuencia, se baja la pareja de la casilla 16 a la 10, y se coloca otra en la 9, todas con los rojos a popa.

Así pues, la posición final de los imanes es: un IT en la casilla 16, rojo a estribor, y una pareja de ILs en las casillas 10 y 9, rojos a popa (o combinaciones equivalentes).

II.4.5. Fuerza ejercida por un imán corrector

Sea y la distancia vertical a la que se encuentra un imán corrector del N de la rosa (punto n); d , la distancia entre los polos de dicho imán, y m, m' , las masas magnéticas del polo N del imán y de la aguja respectivamente. Por los motivos expuestos en el epígrafe I.1.8, los imanes directores de los compases suelen ser bastante cortos, de manera que sus polos se encuentran cerca del centro de la rosa.

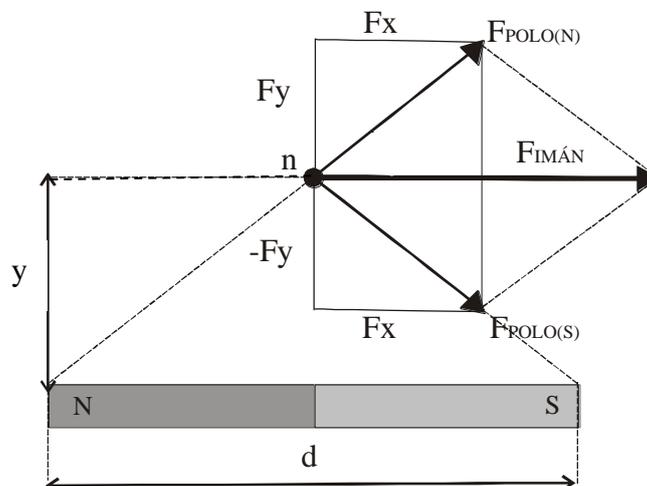


Figura 32. Acción conjunta de los dos polos de un imán corrector sobre el N de la aguja. Fuente: Propia.

En unidades del SI, la fuerza que ejerce el polo del imán sobre el N de la aguja, es:

$$F_{\text{POLO}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4\pi} \cdot \frac{m \cdot m'}{r^2} = 10^{-7} \cdot \mu \cdot \frac{m \cdot m'}{y^2 + \left(\frac{1}{2}d\right)^2}$$

Expresando las masas magnéticas (m, m') en función de los respectivos momentos magnéticos (M, M'), que son las características conocidas del imán corrector y del compás, resulta que:

$$F_{\text{POLO}} = 10^{-7} \cdot \mu \cdot \frac{m \cdot m'}{y^2 + \left(\frac{1}{2}d\right)^2} = 10^{-7} \cdot \mu \cdot \frac{\frac{M}{d} \cdot \frac{M'}{d'}}{y^2 + \left(\frac{1}{2}d\right)^2}$$

donde d' es la distancia entre los polos de la aguja, la cual, en compases con sistemas de agujas múltiples (que son la mayoría), es la suma de las correspondientes distancias de todas las agujas.

Asimismo, la distancia d entre los polos de un imán se puede considerar como 5/6 de la longitud (ℓ) del imán, ya que se asume que cada polo está a 1/12 de dicha longitud (Moréu, 1987, p. 172). Por tanto,

$$F_{\text{POLO}} = 10^{-7} \cdot \mu \cdot \frac{\frac{M}{\frac{5}{6}\ell} \cdot \frac{M'}{\frac{5}{6}\ell'}}{y^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{5}{6}\ell\right)^2} = \frac{1,44 \cdot 10^{-7} \cdot \mu}{\ell \cdot \ell'} \cdot \frac{M \cdot M'}{y^2 + \left(\frac{5}{12}\ell\right)^2}$$

Expresando ahora la distancia vertical y en función de la longitud del imán corrector, de modo que $y = \ell \cdot z$, siendo z la coordenada vertical, resulta que:

$$F_{\text{POLO}} = \frac{1,44 \cdot 10^{-7} \cdot \mu}{\ell \cdot \ell'} \cdot \frac{M \cdot M'}{(\ell \cdot z)^2 + \left(\frac{5}{12}\ell\right)^2} = \frac{1,44 \cdot 10^{-7} \cdot \mu}{\ell^3 \cdot \ell'} \cdot \frac{M \cdot M'}{z^2 + \left(\frac{5}{12}\right)^2}$$

De acuerdo con la Figura 32, la fuerza total que ejerce el imán sobre el N de la aguja es:

$$F_{\text{IMÁN}} = 2 \cdot F_X = 2 \cdot F_{\text{POLO}} \cdot \frac{F_X}{F_{\text{POLO}}} = 2 \cdot F_{\text{POLO}} \cdot \frac{\frac{1}{2}d}{\sqrt{y^2 + \left(\frac{1}{2}d\right)^2}}$$

donde:

$$\frac{\frac{1}{2}d}{\sqrt{y^2 + \left(\frac{1}{2}d\right)^2}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{5}{6} \cdot \ell}{\sqrt{(\ell \cdot z)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{5}{6} \cdot \ell\right)^2}} = \frac{\frac{5}{12}}{\sqrt{z^2 + \left(\frac{5}{12}\right)^2}}$$

Con lo cual,

$$F_{\text{IMÁN}} = \frac{2,88 \cdot 10^{-7} \cdot \mu}{\ell^3 \cdot \ell'} \cdot \frac{M \cdot M'}{z^2 + \left(\frac{5}{12}\right)^2} \cdot \frac{\frac{5}{12}}{\sqrt{z^2 + \left(\frac{5}{12}\right)^2}} = \frac{1,2 \cdot 10^{-7} \cdot \mu}{\ell^3 \cdot \ell'} \cdot \frac{M \cdot M'}{\sqrt{\left(z^2 + \frac{25}{144}\right)^3}}$$

Debido a que los imanes correctores no pueden estar muy cerca de la rosa, hay que mantener una distancia vertical mínima, que se considera el doble de longitud de dichos imanes (Moréu, 1987, p. 164). En consecuencia, el valor mínimo de z es de 2, con lo cual, se puede obviar el

término $25/144 = 0,1736\bar{1}$. Además, la permeabilidad magnética del medio (el aire) es próxima a 1 ($\mu \approx 1$). Por tanto,

$$F_{\text{IMÁN}} \approx \frac{1,2 \cdot 10^{-7}}{\ell^3 \cdot \ell'} \cdot \frac{M \cdot M'}{z^3} = 1,2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{M \cdot M'}{y^3 \cdot \ell'}$$

Así pues, se observa que la fuerza que ejerce un imán corrector es inversamente proporcional al cubo de la distancia vertical a la que se encuentra de la rosa.

Luego, puesto que el desvío que corrige un imán es directamente proporcional a la fuerza que genera, y esta es inversamente proporcional al cubo de la distancia vertical, la relación entre los desvíos que corrige un mismo imán en las casillas o posiciones N y M, viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta_N}{\Delta_M} = \frac{y_M^3}{y_N^3}$$

Ejercicio 13 (Moréu, 1987, p. 67): Un imán produce un desvío de 8° a 10 cm de la rosa. Hallar el desvío que causará a 20 cm.

Solución:

$$\Delta_M = \frac{y_N^3}{y_M^3} \cdot \Delta_N = \frac{10^3}{20^3} \cdot 8^\circ = \frac{1}{2^3} \cdot 8^\circ = 1^\circ$$

Ejercicio 14 (Moréu, 1987, p. 67): Un imán produce un desvío de 10° a 8 cm de la rosa. Hallar la distancia para que el desvío sea de 3° .

$$y_M^3 = \frac{\Delta_N}{\Delta_M} \cdot y_N^3 \Rightarrow y_M = y_N \cdot \sqrt[3]{\frac{\Delta_N}{\Delta_M}} = 8 \cdot \sqrt[3]{\frac{10}{3}} \cong 12 \text{ cm}$$

. . .

Siendo m' la masa magnética del polo N de la aguja, la densidad de flujo magnético (B) que genera un imán corrector a fin de contrarrestar las fuerzas P, Q, R del magnetismo permanente del buque (las cuales, a pesar del nombre de *fuerzas*, son densidades de flujo magnético), viene dada por la siguiente expresión:

$$B_{\text{IMÁN}} = \frac{F_{\text{IMÁN}}}{m'} = \frac{1,2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{M \cdot M'}{y^3 \cdot \ell'}}{M'/\ell'} = 1,2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{M}{y^3} \cdot \frac{10^6 \mu\text{T}}{\text{T}} = 0,12 \cdot \frac{M}{y^3} \mu\text{T}$$

donde M debe estar expresado en $\text{A} \cdot \text{m}^2$, e y, en metros (unidades del SI). Si M está expresado en unidades del sistema CGS ($\text{cm}^{5/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$), se recuerda que $\text{cm}^{5/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1} = 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ (vide Tabla 2).

II.4.6. Estudio del coeficiente D

El comportamiento de los hierros dulces que determinan el coeficiente D, es equivalente al de una varilla a negativa (-a) y al de una e también negativa (-e), dada la distribución continua de los hierros, tanto en el sentido longitudinal, como en el transversal de todo buque (recuérdese que las varillas negativas son las continuas). En la Figura 33, se muestra la inducción de ambas varillas a los distintos rumbos magnéticos, así como los desvíos que provocan.

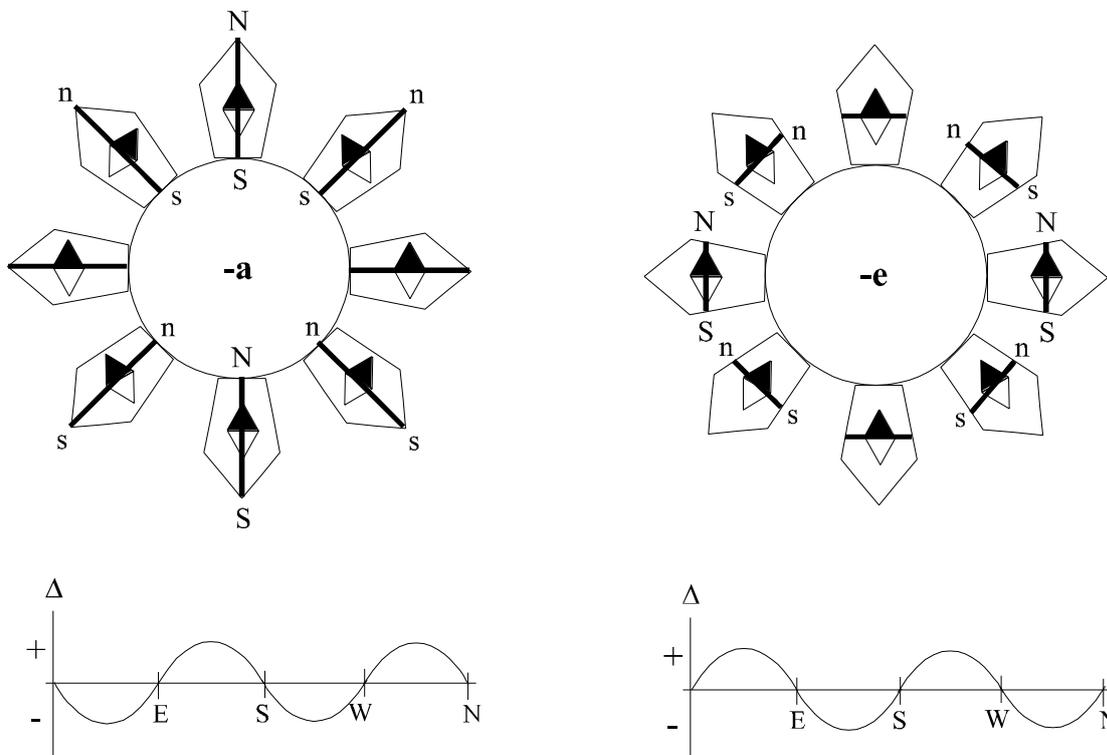


Figura 33. Desvíos causados por las varillas -a, -e. Fuente: Propia.

La inducción de la varilla -a es máxima a los rumbos magnéticos N/S, pero a estos rumbos, solo hay una disminución de la fuerza directriz, sin que se produzca ningún desvío. Asimismo, a los rumbos E/Wm, la varilla -a no se induce, y por tanto, tampoco origina ningún desvío. En cuanto a la varilla -e, su inducción es máxima a los rumbos E/Wm, pero sin que cause desvío. En cambio, a los rumbos N/Sm, esta varilla no se induce, ni genera ningún desvío. Así pues, el efecto conjunto de ambas varillas es nulo a los rumbos magnéticos cardinales.

Respecto a los demás rumbos magnéticos, se observa como las varillas -a, -e producen desvíos de signo contrario a un mismo rumbo. En los cuadrantes I y III, el desvío de la varilla -a es negativo, y el de la -e, positivo; mientras que en los cuadrantes II y IV, el desvío de la varilla -a es positivo, y el de la -e, negativo.

Normalmente, la varilla -e predomina sobre la -a, resultando de la acción conjunta de ambas varillas, una -e residual (Moreu, 1987, p. 125).

II.4.7. Correctores del coeficiente D: esferas

La compensación del coeficiente D consiste en anular el efecto de la varilla $-e$ residual, lo que se consigue colocando una $+e$; esto es: una varilla de hierro dulce en el plano de la rosa, y que sea transversal a la misma (de babor a estribor). La intensidad de esta varilla depende de: su permeabilidad magnética, su longitud, y la distancia entre el centro de la rosa y su extremo próximo a ella. También se pueden colocar dos varillas transversales más cortas, una a cada lado de la aguja, de modo que su efecto conjunto sea el mismo. No obstante, el sistema preferido es el de esferas, consistente en sustituir las dos varillas por dos bolas de hierro dulce, cuyos centros estén en el plano de la rosa. Suele haber la costumbre de pintar de rojo la esfera de babor y de verde la de estribor (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 63).

Al instalar las esferas, se introducen dos varillas $+e$ y dos $-a$. Las dos varillas $+e$ corresponden al componente transversal de la inducción de las esferas, mientras que las dos varillas $-a$ se deben a los componentes longitudinales de la inducción, y puesto que el desvío que provocan las varillas $-a$ es de signo contrario al de la varilla $-e$ residual, ayudan a su compensación. Sin embargo, del mismo modo que las esferas generan dos varillas $-a$, también dan lugar a dos varillas $-k$, cuyo fenómeno se denomina influjo de las esferas (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 84), y si bien su efecto no es deseado, tampoco es problemático, ya que se anula con el corrector de escora al compensar el desvío de escora. En definitiva, las dos esferas son equivalentes a las siguientes varillas: dos $+e$, dos $-a$ y dos $-k$, empleándose las dos primeras parejas para compensar el coeficiente D.

Cabe señalar que: cuando el efecto de la varilla $-a$ predomina sobre el de la varilla $-e$, lo que se traduce en un D negativo, las esferas se deben instalar de proa a popa, con el fin de crear dos varillas $+a$ y dos $-e$.

Las esferas se colocan en unos soportes de bronce (o de otro material antimagnético) que se encuentran a ambos lados de la bitácora. Estos soportes están alargados en la dirección de babor a estribor, y tienen una ranura en esta misma dirección (en su parte central) por la que se desliza un pivote unido a la esfera. De esta forma, las esferas se pueden acercar o alejar de la rosa hasta determinar el punto en el que anulan el coeficiente D. Una vez en esta posición, se hacen firmes atornillando sus pivotes. Los diámetros de las esferas varían desde los 51 mm hasta los 305 mm (2–12 pulgadas), siendo huecas, por razón de su peso, las superiores a 152 mm, aunque esto no influye, debido a la superficialidad del magnetismo. Para cada modelo de aguja, vienen tabuladas las distancias a las que se deben dejar ambas esferas del centro de la rosa, las cuales están en función de su diámetro y del coeficiente D. Estas distancias pueden estar referidas a los puntos de las esferas más próximos a la rosa o al centro de las mismas, y

con el objeto de facilitar la colocación exacta de las esferas, algunos soportes llevan una graduación con dichas distancias. (Moréu, 1987, pp. 170, 64)

A continuación, se muestra la tabla correspondiente a la aguja seca Thomson de 254 mm de diámetro, que es la que viene recogida en la Tabla XLVII de las Tablas náuticas españolas (T.N.). En ella, se dan las distancias desde el centro de la rosa hasta el punto más próximo de las esferas, y aunque este modelo de aguja ya no se utiliza, el tipo de tabla es válida a fines de estudio, y puede servir de orientación si no se dispone de otra.

Coef.	D i á m e t r o (mm)													
	D	114	127	140	152	165	178	191	203	216	229	254	279	305
1	261													
1,5	220	245												
2	195	217	239	260										
2,5	177	197	216	236	256									
3	163	181	199	218	236	254								
3,5	152	169	186	203	220	237	254							
4	143	159	175	191	207	223	239	255						
4,5	135	150	165	180	196	211	226	241	256					
5	129	143	157	172	186	201	215	229	243	258				
5,5		137	150	164	178	190	205	219	232	246				
6		131	144	157	170	183	196	209	223	236	262			
6,5			138	151	164	176	188	201	214	226	251			
7			133	145	157	170	182	194	206	218	242	269		
7,5			129	140	152	163	176	187	198	210	233	259		
8				136	147	158	170	181	192	204	227	251	275	
8,5				132	143	154	165	176	186	197	219	243	266	
9					138	149	160	170	181	192	213	235	257	
9,5					134	145	155	165	175	186	207	228	250	
10					131	141	151	161	171	181	201	222	243	
10,5						137	147	157	167	177	196	216	236	
11						134	143	153	162	172	191	210	230	
11,5						131	140	149	159	168	187	205	224	
12							137	146	155	164	182	200	219	
12,5							133	143	151	160	178	196	214	
13								139	148	156	174	192	209	
13,5								136	145	153	170	187	204	
14								133	142	149	166	184	200	
14,5									138	146	163	180	196	
15									136	143	160	177	193	
15,5									133	140	156	173	189	
16										138	153	170	185	
Coef.	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	10	11	12	
D	D i á m e t r o (pul.)													

Tabla 6. Coeficiente D que anulan las esferas según su diámetro y su distancia al centro de la rosa. Fuente: T.N. Tabla XLVII, p. 302.

Estas tablas también permiten conocer el diámetro de las esferas para que: en función del coeficiente D obtenido, queden a la mitad de su posible recorrido, a fin de poder acercarlas o alejarlas, si por cualquier circunstancia anormal, cambiara el valor de dicho coeficiente. Así por ejemplo, si $D = 8^\circ$, las esferas más adecuadas son las de 191 mm, ya que pueden anular desde $3,5^\circ$ ($5,5^\circ$ por debajo de los 8°) hasta $12,5^\circ$ ($4,5^\circ$ por encima), siendo la amplitud mínima de $4,5^\circ$. Las esferas de 203 mm también son adecuadas, ya que pueden anular desde 4° (4° por

debajo) hasta 14° (6° por encima), pero la amplitud mínima es menor: 4° . También se observa que una esfera de 140 mm o menor es incapaz de anular un $D = 8^\circ$, puesto que tendría que estar más cerca del centro de la rosa de lo que la ranura del soporte o el borde de la bitácora le permiten. Por el contrario, una esfera de 254 mm o mayor no puede anular un $D = 5^\circ$, ya que debería hallarse a una distancia mayor que la longitud del soporte. (T.N., pp. 34–35 de la Explicación y uso de las tablas)

En el manejo de las esferas, es oportuno tomar las siguientes precauciones: colocar las esferas equidistantes del centro de la aguja, y no intercambiarlas ni giralas posteriormente, a fin de evitar la posible influencia del magnetismo remanente que pudieran tener. Asimismo, una vez instaladas, se recomienda marcarlas, de manera: con una simple observación, se pueda determinar si, por cualquier circunstancia, se han movido. Además, para evitar los efectos de inducción ocasionados por los imanes correctores y los del sistema magnético de la aguja, se aconseja utilizar esferas grandes y alejadas del mortero. A tal efecto, la distancia mínima entre el centro de la rosa y el punto más próximo de las esferas es de 1,25 veces la longitud del imán más largo del sistema orientador. Citar por último, que excepcionalmente, puede darse el caso de que solo sea necesaria una esfera. (Moréu, 1987, pp. 170–171)

Ejercicio 15 (propio): En una bitácora, las esferas tienen 229 mm de diámetro, y están colocadas por el través, con sus puntos más próximos a la rosa a 204 mm de su centro. Se rectifica la compensación, y se obtiene $D = +2$. Calcular la posición definitiva de las esferas.

Solución:

Valor inicial del coeficiente D (D_i): en la columna de 229 mm, se busca la distancia de 204 mm (o valor más próximo), y siguiendo la fila de 204 mm hacia la izquierda, se obtiene $D_i = 8$, que es positivo por estar las esferas de babor a estribor (sería negativo si estuvieran de proa a popa).

Puesto que se ha obtenido un coeficiente D residual (D_r) de +2, el coeficiente D total (D_t) es de +10. Luego, si con las mismas esferas, se pretende anular este D_t , habrá que dejarlas a una distancia de 181 mm (columna de 229 mm, fila de 10°).

Ejercicio 16 (propio): En una bitácora, se instalaron esferas de 191 mm, de babor a estribor, y con sus puntos más próximos a la rosa a 140 mm de su centro. Posteriormente, se obtiene $D = +2,5$. Calcular la posición definitiva de las esferas.

Solución:

$$\left. \begin{array}{l} \varnothing = 191 \text{ mm} \\ d = 140 \text{ mm} \end{array} \right\} \rightarrow D_i = 11,5 \quad D_t = D_i + D_r = +11,5 + 2,5 = +14$$

Con estas esferas, no se puede anular un $D=14$. Asimismo, por tratarse de un D considerablemente grande, no hay ningún tamaño de esferas que permita dejarlas aproximadamente a la mitad de su recorrido. Entonces, es preferible emplear esferas grandes y alejadas del centro de la rosa, que pequeñas y más cercanas, evitando así su posible inducción por parte de los imanes correctores y orientadores. En este caso, se instalarían esferas de 305 mm de diámetro, con sus puntos más próximos a la rosa a 200 mm de su centro. También se observa que la elección de las esferas de 191 mm no fue acertada, porque ya inicialmente, quedaron demasiado cerca de la rosa, como se observa en la fila de $D = 11,5$.

II.4.8. Métodos para compensar el coeficiente D

Existe una analogía entre las formas de compensar el coeficiente D y el desvío semicircular.

Un método consiste en: tomar los desvíos a los cuatro rumbos cuadrantales; calcular el coeficiente D , y mediante la tabla, determinar la posición de las esferas. Para ello, es necesario aproar a cuatro rumbos.

Sin embargo, se suele emplear otro método en el que solo se precisan dos rumbos (Moréu, 1987, pp. 182–184):

Si previamente se ha compensado el desvío semicircular, y se aproa a un rumbo magnético cuadrantal (por ejemplo al NEm), se tiene:

$$\Delta_{ne} = A + B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707 + D$$

Pero $B, C = 0$, por estar anulado el desvío semicircular, con lo cual,

$$\Delta_{ne} = A + D$$

Entonces, se anula este desvío (mediante la tabla o moviendo las esferas a tanteo), de forma que el coeficiente D no se habrá anulado completamente, sino que se habrá alterado, resultando un coeficiente D residual (D_r):

$$\Delta_{ne} = 0 = A + D_r$$

Luego, se va a otro rumbo magnético que no sea el opuesto (por ejemplo al SEM), donde:

$$\Delta_{se} = A + B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 - D_r = A - D_r$$

Por tanto,

$$\left. \begin{array}{l} \Delta_{ne} = 0 = A + D_r \\ \Delta_{se} = A - D_r \end{array} \right\} \Rightarrow -\Delta_{se} = 2D_r \Rightarrow D_r = -\frac{1}{2} \Delta_{se}$$

En consecuencia, para anular el coeficiente D_r , se debe anular la mitad del Δ_{se} .

Si se aproase al opuesto del primer rumbo (al SWm en este caso), resultaría:

$$\Delta_{sw} = A - B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 + D_r = A + D_r = \Delta_{ne} = 0$$

Es decir: al opuesto, el desvío siempre será nulo, excepto si intervienen otros desvíos no considerados, como el sextantal o el octantal.

En resumen, el método consiste en: aproar a un rumbo cuadrantal cualquiera, y anular todo el desvío; y luego, ir a otro rumbo distante 90°, y solo anular la mitad.

COMENTARIO (propio)

Este método se puede simplificar a un único rumbo si se determina el coeficiente A:

Al anular el desvío semicircular, se obtuvo:

$$\left. \begin{aligned} \Delta n = 0 = A + C' + E \\ \Delta s = A - C' + E \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta s = 2A + 2E \quad \left. \begin{aligned} \Delta e = 0 = A + B' - E \\ \Delta w = A - B' - E \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta w = 2A - 2E$$

Luego,

$$\left. \begin{aligned} \Delta s = 2A + 2E \\ \Delta w = 2A - 2E \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \Delta s + \Delta w = 4A \Rightarrow A = \frac{1}{4}(\Delta s + \Delta w) \\ \Delta s - \Delta w = 2E \Rightarrow E = \frac{1}{4}(\Delta s - \Delta w) \end{cases}$$

Obsérvese que también se obtiene el coeficiente E. Pero una vez conocido el A,

$$\Delta ne = A + D \Rightarrow D = \Delta ne - A$$

Por tanto, no hay que anular exactamente el desvío, sino alterar D grados el rumbo de aguja.

Ejercicio 17 (propio): En el Ejercicio 12, se compensó el desvío semicircular. Posteriormente, se arrumba al SEm, y se anula todo el desvío con unas esferas de 203 mm de diámetro. Luego, se va al SWm, y se anula la mitad. Los desvíos son: $\Delta se = -6$, $\Delta sw = +4$. Determinar la posición definitiva las esferas.

Solución:

Puesto que se ha anulado el desvío semicircular,

$$\begin{aligned} \Delta se = A + B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 - D = A - D \\ \Delta sw = A - B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 + D = A + D \end{aligned}$$

Después de anular el Δse , las esferas quedan en una posición que compensan un $Di = +6$, ya que se ha supuesto que $\Delta se = -D$. Sin embargo, queda el coeficiente A y un Dr , o sea:

$$\left. \begin{aligned} \Delta se = 0 = A - Dr \\ \Delta sw = A + Dr \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta sw = 2Dr \Rightarrow Dr = \frac{1}{2} \Delta sw = +2$$

Por tanto,

$$\left. \begin{aligned} Dt = Di + Dr = 6 + 2 = 8 \\ \begin{matrix} \varnothing = 203\text{mm} \\ D = 8 \end{matrix} \end{aligned} \right\} \rightarrow d = 181\text{mm}$$

Ejercicio 18 (propio): Repetir el Ejercicio 17, considerando que solo se arrumba al SEm.

Solución:

$$\Delta se = A + B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 - D = A - D \Rightarrow D = A - \Delta se$$

En este caso, es necesario determinar el coeficiente A, el cual se calcula mediante los desvíos obtenidos durante la compensación del desvío semicircular (Ejercicio 12):

$$\left. \begin{array}{l} \Delta n = 0 = A + C' + E \\ \Delta s = 2 = A - C' + E \\ \Delta e = 0 = A + B' - E \\ \Delta w = 6 = A - B' - E \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} 2 = 2A + 2E \\ 6 = 2A - 2E \end{array} \Rightarrow 8 = 4A \Rightarrow A = +2 \Rightarrow D = A - \Delta se = 2 + 6 = +8$$

Con $D = 8$, se obtiene una distancia de 181 mm, igual que en el Ejercicio 17.

II.4.9. Compensación del coeficiente E: giro de las esferas

El desvío cuadrantal viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta c = D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' = D \cdot \sin 2R' + E \cdot \sin(2R' + 90^\circ) = D \cdot \sin 2R' + E \cdot \sin 2(R' + 45^\circ)$$

Por tanto, el desvío producido por el coeficiente E tiene un desfase de 45° con el desvío causado por el coeficiente D (Moréu, 1987, p. 198). Luego, el E se puede corregir instalando un par de esferas como las que anulan el D (de tamaño y a la distancia adecuada), pero giradas 45° con respecto a estas.

Sean $|D|$, $|E|$ los valores absolutos de los coeficientes D, E.

Si D es positivo, la parte del desvío cuadrantal que depende de D es:

$$\Delta c_D = D \cdot \sin 2R' = |D| \cdot \sin 2R'$$

Y si D es negativo,

$$\Delta c_D = D \cdot \sin 2R' = -|D| \cdot \sin 2R' = |D| \cdot \sin(2R' + 180^\circ) = |D| \cdot \sin 2(R' + 90^\circ)$$

En este segundo caso, las esferas se deben girar 90° con respecto a la posición que tendrían si D fuera positivo; es decir: colocarlas de proa a popa, como ya se apuntó en el epígrafe II.4.7.

Si E es positivo, la parte del desvío cuadrantal que depende de E es: $\Delta c_E = |E| \cdot \sin 2(R' + 45^\circ)$

Y si E es negativo, $\Delta c_E = E \cdot \sin 2(R' + 45^\circ) = |E| \cdot \sin[2(R' + 45^\circ) + 180^\circ] = |E| \cdot \sin 2(R' + 135^\circ)$

Así pues, si E es positivo, las esferas que anulan este coeficiente, se deben girar 45° en el sentido de los rumbos (horario) con respecto a las que anulan un D positivo, o sea: girarlas 45° en sentido horario respecto de la línea del través. Por el contrario, si E es negativo, hay que girar las esferas 135° en sentido horario respecto del través, o lo que es lo mismo, 45° en sentido antihorario.

Asimismo, el desvío cuadrantal tiene la siguiente expresión:

$$\Delta c = \sqrt{D^2 + E^2} \cdot \sin 2(R' + \omega'), \text{ donde } \tan 2\omega' = \frac{E}{D}$$

En consecuencia, el efecto conjunto de los dos pares de esferas debe ser igual que el de una sola pareja que anule un $\Delta c = \sqrt{D^2 + E^2}$. Además, tanto las partes Δc_D y Δc_E , como el desvío cuadrantal completo, dependen del seno del doble de un ángulo, el cual es: $R' + 0^\circ$ o 90°

en el caso de Δc_D ; $R' \pm 45^\circ$ en el caso de Δc_E , y $R' + \omega'$ en el caso del desvío cuadrantal completo. Pero los ángulos relativos a las partes Δc_D y Δc_E son el rumbo de aguja (R') más el ángulo que están giradas las esferas respecto a la línea del través, con lo cual, ω' tiene que ser el ángulo (respecto a dicha línea) que se deben girar las esferas que anulan el $\Delta c = \sqrt{D^2 + E^2}$. En algunas bitácoras, los soportes se pueden girar, aunque no es lo habitual. En este último caso, el coeficiente E queda como un desvío residual, contemplado en la curva o tablilla de los desvíos que se levanta después de efectuar la compensación.

Ejercicio 19 (propio): Repetir el Ejercicio 18, considerando el coeficiente E.

Solución:

En el Ejercicio 18, se obtuvo:

$$\left. \begin{array}{l} 2 = 2A + 2E \\ 6 = 2A - 2E \end{array} \right\} \Rightarrow -4 = 4E \Rightarrow E = -1$$

Luego,

$$\tan 2\omega' = \frac{E}{D} = \frac{-1}{8} = -0,125 \Rightarrow 2\omega' = N07W = 353 \Rightarrow \omega' = 176,5$$

Pero un giro de $176,5^\circ$ en sentido horario es lo mismo que $3,5^\circ$ en sentido antihorario.

Asimismo,

$$\Delta c = \sqrt{D^2 + E^2} = D \cdot \sec 2\omega' = 8 \cdot 1,008 = 8,1$$

Ahora, hay que entrar en la tabla con el desvío cuadrantal en lugar del coeficiente D:

$$\left. \begin{array}{l} \emptyset = 203 \text{ mm} \\ \Delta c = 8,1 \cong 8 \end{array} \right\} \rightarrow d = 181 \text{ mm}$$

Por tanto, las esferas se colocan de babor a estribor, giradas $3,5^\circ$ en sentido antihorario, y con sus puntos más próximos a la rosa a 181 mm de su centro.

Ejercicio 20 (propio): Determinar la posición definitiva de las esferas de los Ejercicios 12, 17 y 18, si se hubiera obtenido $E = -2$.

Solución:

Inicialmente, las esferas no estaban giradas, con lo cual, $D_i = +8$, $E_i = 0$. Luego, $D_r = +2$, $E_r = -2$, y por consiguiente, $D_t = +10$, $E_t = -2$.

$$\tan 2\omega' = \frac{E}{D} = \frac{-2}{10} = -0,2 \Rightarrow 2\omega' = N11,5W = 348,5 \Rightarrow \omega' = 174,25 \cong 174 = 6 \text{ antihorario}$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta c = D \cdot \sec 2\omega' = 10 \cdot 1,02 = 10,2 \\ \emptyset = 229 \text{ mm} \\ \Delta c = 10,2 \cong 10 \end{array} \right\} \rightarrow d = 181 \text{ mm}$$

Las esferas se colocan de babor a estribor, giradas 6° en sentido antihorario, y con sus puntos más próximos a la rosa a 181 mm de su centro.

Ejercicio 21 (propio): En una bitácora, hay instaladas esferas de 203 mm, de proa a popa, giradas 7° en sentido antihorario, y con sus puntos más próximos a la rosa a 181 mm de su centro. Se rectifica la compensación, y se obtiene D = +2, E = +1. Calcular su posición definitiva.

Solución:

Coefficientes iniciales:

$$\left. \begin{array}{l} \varnothing = 203\text{mm} \\ d = 181\text{mm} \end{array} \right\} \rightarrow \Delta c = 8$$

Respecto del través, $\omega' = 90 - 7 = 83$

$$\Delta c = D \cdot \sec 2\omega' \Rightarrow D = \Delta c \cdot \cos 2\omega' = 8 \cdot \cos 166 = 8 \cdot (-0,97) = -7,8$$

$$\tan 2\omega' = \frac{E}{D} \Rightarrow E = D \cdot \tan 2\omega' = \Delta c \cdot \cos 2\omega' \cdot \tan 2\omega' = \Delta c \cdot \sin 2\omega' = 8 \cdot \sin 166 = 8 \cdot 0,242 = +1,9$$

Posición definitiva:

$$D_t = D_i + D_r = -7,8 + 2 = -5,8 \quad E_t = E_i + E_r = 1,9 + 1 = +2,9$$

$$\tan 2\omega' = \frac{E}{D} = \frac{2,9}{-5,8} = -0,5 \Rightarrow 2\omega' = S26,5 E = 153,5 \Rightarrow \omega' = 76,75 \cong 77 = 13 \text{ antihorario}$$

$$\Delta c = D \cdot \sec 2\omega' = -5,8 \cdot (-1,117) = 6,5 \quad \left. \begin{array}{l} \varnothing = 203\text{mm} \\ \Delta c = 6,5 \end{array} \right\} \rightarrow d = 201\text{mm}$$

Las esferas se colocan de proa a popa, giradas 13° en sentido antihorario, y con sus puntos más próximos a la rosa a 201 mm de su centro.

II.4.10. Casos prácticos de compensación preliminar

Los siguientes casos prácticos están basados en ejercicios realizados por el exprofesor de la Facultad de Náutica de Barcelona, R. Jaime Pérez.

Caso A: Ejercicio 22: En una bitácora, hay instalados los siguientes correctores: una pareja de ILs en las casillas 10 y 6, con la polaridad roja a popa; un IT en las casillas 16 y 10, rojos a babor, y dos esferas de babor a estribor, de 229 mm, cuyos puntos más cercanos a la rosa están a 258 mm de su centro. En un lugar de Pr = 0,5, se obtienen los siguientes desvíos:

$$\Delta n = +6 \quad \Delta ne = +7 \quad \Delta e = +1 \quad \Delta se = -3 \quad \Delta s = -2 \quad \Delta sw = -3 \quad \Delta w = -5 \quad \Delta nw = -1$$

Determinar la posición definitiva de los correctores, así como los desvíos semicircular y cuadrantal al S40W a si no hubiera ningún corrector instalado.

Solución:

Cálculo de los coeficientes

$$A = \frac{1}{8} \sum_8 \Delta = \frac{1}{8} (6 + 7 + 1 - 3 - 2 - 3 - 5 - 1) = 0$$

$$B = \frac{1}{2} (\Delta e - \Delta w) = \frac{1}{2} (1 + 5) = +3$$

$$C = \frac{1}{2} (\Delta n - \Delta s) = \frac{1}{2} (6 + 2) = +4$$

$$D = \frac{1}{4} (\Delta ne + \Delta sw - \Delta se - \Delta nw) = \frac{1}{4} (7 - 3 + 3 + 1) = +2$$

$$E = \frac{1}{4} (\Delta n + \Delta s - \Delta e - \Delta w) = \frac{1}{4} (6 - 2 - 1 + 5) = +2$$

Compensación del desvío semicircular

Se debe colocar una pareja de ILs en la siguiente casilla:

$$n = \frac{B}{2Pr} = \frac{3}{1} = 3, \text{ rojos a proa}$$

Pero hay una pareja de ILs en las casillas 10 y 6 con los rojos a popa, que equivale a una pareja en la 16. Por consiguiente, la posición definitiva de los ILs debe ser la de una pareja en la casilla 13 o combinación equivalente, rojos a popa. Una forma de lograr esta combinación consiste en bajar la pareja de la casilla 10 a la 7.

$$\text{IT: } n = \frac{C}{Pr} = \frac{4}{0,5} = 8, \text{ rojo a estribor}$$

Los ITs que ya están instalados son equivalentes a uno solo en la casilla teórica 26, rojo a babor, de forma que la posición definitiva de los ITs consiste en colocar uno en la casilla 18 o combinación equivalente, rojo a babor. En este caso, se puede bajar el de la 16 a la 8.

Coeficientes D, E iniciales

$$\left. \begin{array}{l} \varnothing = 229 \text{ mm} \\ d = 258 \text{ mm} \end{array} \right\} \rightarrow \Delta c = 5$$

Puesto que las esferas no están giradas, $D = +5$, $E = 0$.

Posición definitiva de las esferas

$$D_t = D_i + D_r = 5 + 2 = +7 \quad E_t = E_i + E_r = +2$$

$$\tan 2\omega' = \frac{E}{D} = \frac{2}{7} = 0,286 \Rightarrow 2\omega' = N16E = 16 \Rightarrow \omega' = 8$$

$$\Delta c = D \sec 2\omega' = 7 \cdot 1,04 = 7,3 \quad \left. \begin{array}{l} \varnothing = 229 \text{ mm} \\ \Delta c = 7,3 \cong 7,5 \end{array} \right\} \rightarrow d = 210 \text{ mm}$$

Solución: posición definitiva de los correctores

Una pareja de ILs en las casillas 6 y 7, rojos a popa, y un IT en las casillas 8 y 10, rojos a babor (o combinaciones equivalentes). Esferas de babor a estribor, giradas 8° en sentido horario, y con sus puntos más próximos a la rosa a 210 mm de su centro.

Desvío semicircular y cuadrantal al S40Wa

La posición teórica de los imanes es: una pareja de ILs en la casilla 13, rojos a popa, y un IT en la 18, rojo a babor. Por consiguiente,

$$B = n \cdot 2Pr = 13 \cdot 1 = 13, \text{ negativo por estar los rojos a popa, o sea: } B = -13$$

$$C = n \cdot Pr = 18 \cdot 0,5 = 9, \text{ negativo por estar los rojos a babor, o sea: } C = -9$$

$$R' = S40W = 220 \Rightarrow 2R' = 440 \equiv 440 - 360 = 80$$

$$\begin{aligned} B \cdot \sin R' &= -13 \cdot (-0,643) = +8,4 & D \cdot \sin 2R' &= 7 \cdot 0,985 = +6,9 \\ C \cdot \cos R' &= -9 \cdot (-0,766) = +6,9 & E \cdot \cos 2R' &= 2 \cdot 0,174 = +0,3 \\ \Delta_{sc} &= +15,3 & \Delta_c &= +7,2 \end{aligned}$$

Así pues, al S40Wa, el desvío semicircular es de +15,3°, y el cuadrantal, de +7,2°.

Caso B: Ejercicio 23: Sin ningún corrector instalado, se procede a efectuar una compensación preliminar en un lugar de Pr = 0,5 y con esferas de 191 mm. El buque bornea a los cuatro rumbos cardinales, anulando los desvíos (o la mitad) a medida que van apareciendo. Una vez anulado el desvío semicircular, pone proa a un rumbo cuadrantal. En este caso, el orden de los rumbos es N, E, S, W, SW, obteniendo los siguientes desvíos:

$$\Delta_n = -6 \quad \Delta_e = +11 \quad \Delta_s = -2 \quad \Delta_w = +2 \quad \Delta_{sw} = +8$$

Determinar la posición de los correctores.

Solución:

Compensación del desvío semicircular

$$IT: n = \frac{\Delta_n}{Pr} = \frac{6}{0,5} = 12, \text{ rojo a babor}$$

Entonces, queda:

$$\Delta_n = 0 = A + C' + E$$

Luego,

$$ILs: n = \frac{\Delta_e}{2Pr} = \frac{11}{1} = 11, \text{ rojos a proa}$$

Quedando:

$$\Delta_e = 0 = A + B' - E$$

En consecuencia,

$$\left. \begin{aligned} \Delta_n = 0 &= A + C' + E \\ \Delta_s = -2 &= A - C' + E \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} 2 = 2C' \Rightarrow C' = +1 \\ -2 = 2A + 2E \end{cases}$$

$$IT: n = \frac{C'}{Pr} = \frac{1}{0,5} = 2, \text{ rojo a estribor}$$

Pero al Nm, se colocó un IT en la casilla 12, rojo a babor, de forma que la posición definitiva de este IT debe ser en la casilla 10, rojo a babor.

Asimismo,

$$\left. \begin{array}{l} \Delta e = 0 = A + B' - E \\ \Delta w = 2 = A - B' - E \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} -2 = 2B' \Rightarrow B' = -1 \\ 2 = 2A - 2E \end{cases}$$

$$\text{ILs: } n = \frac{B'}{2Pr} = \frac{1}{1} = 1, \text{ rojos a popa}$$

Pero al Em, se colocó una pareja de ILs en la casilla 11, rojos a proa, de modo que la posición definitiva de esta pareja de ILs debe ser en la casilla 10, rojos a proa.

Coeficientes A, E

$$\left. \begin{array}{l} -2 = 2A + 2E \\ 2 = 2A - 2E \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} 0 = 4A \Rightarrow A = 0 \\ -4 = 4E \Rightarrow E = -1 \end{cases}$$

Compensación del desvío cuadrantal

$$\Delta_{sw} = A - B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 + D = D = +8$$

$$\tan 2\omega' = \frac{E}{D} = \frac{-1}{8} = -0,125 \Rightarrow 2\omega' = N07W = 353 \Rightarrow \omega' = 176,5 = 3,5 \text{ antihorario}$$

$$\Delta c = D \cdot \sec 2\omega' = 8 \cdot 1,008 = 8,1 \quad \left. \begin{array}{l} \varnothing = 191 \text{ mm} \\ \Delta c = 8,1 \cong 8 \end{array} \right\} \rightarrow d = 170 \text{ mm}$$

Solución: posición de los correctores

Un IT en la casilla 10, rojo a babor, y una pareja de ILs en la casilla 10, rojos a proa. Esferas de babor a estribor, giradas $3,5^\circ$ en sentido antihorario, y con sus puntos más próximos a la rosa a 170 mm de su centro.

Caso C: Ejercicio 24: En una bitácora, hay instalados los siguientes correctores: un IT en la casilla 12, rojo a estribor; una pareja de ILs en la 10, rojos a proa, y dos esferas de 203 mm, de babor a estribor, giradas una cuarta en sentido horario, y con sus puntos más cercanos a la rosa a 176 mm de su centro. En un lugar de $Pr = 0,25$, se obtienen los siguientes desvíos, y en el orden con que se citan, los cuales se anulan completa o parcialmente, según proceda, a medida que aparecen:

$$\Delta s = -10 \quad \Delta w = +8 \quad \Delta n = -3 \quad \Delta e = -1 \quad \Delta se = +3$$

Determinar la posición definitiva de los correctores.

Solución:

Compensación del desvío semicircular

$$\text{IT: } n = \frac{\Delta s}{Pr} = \frac{10}{0,25} = 40, \text{ rojo a estribor}$$

Puesto que hay un IT en la casilla 12, también con el rojo a estribor, la casilla resultante debe ser la 52. Una forma de lograr una combinación correspondiente a esta casilla es la siguiente: se sube el IT de la 12 a la 20, y se colocan otros ITs en las casillas 18 y 14, todos con el rojo a estribor. Entonces, queda:

$$\Delta s = 0 = A - C' + E$$

Luego,

$$\text{ILs: } n = \frac{\Delta w}{2Pr} = \frac{8}{0,5} = 16, \text{ rojos a popa}$$

Puesto que hay una pareja de ILs en la casilla 10 con los rojos a proa, el casillero resultante debe ser el 6, con los rojos a popa. Por tanto, se baja la pareja de la casilla 10 a la 6, y se les invierte la polaridad (rojos a popa). Con esto,

$$\Delta w = 0 = A - B' - E$$

Por consiguiente,

$$\left. \begin{array}{l} \Delta s = 0 = A - C' + E \\ \Delta n = -3 = A + C' + E \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} -3 = 2C' \Rightarrow C' = -1,5 \\ -3 = 2A + 2E \end{cases}$$

$$\text{IT: } n = \frac{C'}{Pr} = \frac{1,5}{0,25} = 6, \text{ rojo a babor}$$

Pero al Sm, los ITs quedaron en la casilla teórica 52, rojos a estribor, con lo cual, la casilla definitiva debe ser la 46, rojos a estribor. Considerando la combinación propuesta al Sm, una posibilidad consiste en bajar el IT de la casilla 18 a la 12, manteniendo la polaridad (rojo a estribor). Luego, se podría subir el de la 14 a la 16, a fin de bajar el de la 20 a la 18, dejando así los imanes más alejados de la aguja. Entonces, las casillas definitivas serían la 18, la 16 y la 12. Asimismo,

$$\left. \begin{array}{l} \Delta w = 0 = A - B' - E \\ \Delta e = -1 = A + B' - E \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} -1 = 2B' \Rightarrow B' = -0,5 \\ -1 = 2A - 2E \end{cases}$$

$$\text{ILs: } n = \frac{B'}{2Pr} = \frac{0,5}{0,5} = 1, \text{ rojo a popa}$$

Se sube la pareja de ILs de la casilla 6 a la 7, manteniendo la polaridad (rojos a popa).

Coefficientes A, E

$$\left. \begin{array}{l} -3 = 2A + 2E \\ -1 = 2A - 2E \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} -4 = 4A \Rightarrow A = -1 \\ -2 = 4E \Rightarrow E = -0,5 \end{cases}$$

Coeficientes D, E iniciales

$$\left. \begin{array}{l} \varnothing = 203 \text{ mm} \\ d = 176 \text{ mm} \end{array} \right\} \rightarrow \Delta c = 8,5$$

Respecto del través, $\omega' = +11,25^\circ$. Luego,

$$D = \Delta c \cdot \cos 2\omega' = 8,5 \cdot \cos 22,5 = 8,5 \cdot 0,924 = +7,9$$

$$E = \Delta c \cdot \sin 2\omega' = 8,5 \cdot \sin 22,5 = 8,5 \cdot 0,383 = +3,3$$

Posición definitiva de las esferas

$$\Delta_{se} = A + B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 - D = A - D \Rightarrow D = A - \Delta_{se} = -1 - 3 = -4$$

$$D_t = D_i + D_r = 7,9 - 4 = +3,9 \quad E_t = E_i + E_r = 3,3 - 0,5 = +2,8$$

$$\tan 2\omega' = \frac{E}{D} = \frac{2,8}{3,9} = 0,718 \Rightarrow 2\omega' = N35,5E = 35,5 \Rightarrow \omega' = 17,75 \cong 18$$

$$\Delta c = D \cdot \sec 2\omega' = 3,9 \cdot 1,228 = 4,8 \quad \left. \begin{array}{l} \varnothing = 203 \text{ mm} \\ \Delta c = 4,8 \cong 5 \end{array} \right\} \rightarrow d = 229 \text{ mm}$$

Compensación del coeficiente A

El coeficiente A se puede corregir girando la bitácora 1° a babor. Ahora bien: dada la pequeñez de A, y la complejidad de girar la bitácora el ángulo adecuado, lo más oportuno, tal como se apuntó en el epígrafe II.2.3, es dejar este desvío constante como un desvío residual, cuyo efecto queda contemplado en la curva o tablilla de los desvíos residuales.

Solución: posición definitiva de los correctores

Un IT en las casillas 12, 16 y 18, rojos a estribor, y una pareja de ILs en la casilla 7, rojos a popa (o combinaciones equivalentes). Esferas de babor a estribor, giradas 18° en sentido horario, y con sus puntos más próximos a la rosa a 229 mm de su centro.

Caso D: Ejercicio 25: En una bitácora, hay instalados los siguientes correctores: un IT en la casilla 18, rojo a babor; una pareja de ILs en las casillas 10 y 12, rojos a proa, y esferas de 152 mm, de babor a estribor, en los extremos de los soportes (en la posición más alejada de la rosa). En un lugar de $Pr = 0,25$, se toman los siguientes desvíos:

$$\Delta_n = 0 \quad \Delta_{ne} = -6 \quad \Delta_e = +1 \quad \Delta_{se} = +6 \quad \Delta_s = -1 \quad \Delta_{sw} = -7 \quad \Delta_w = -1 \quad \Delta_{nw} = +5$$

Determinar la posición definitiva de los correctores.

Solución:

Cálculo de los coeficientes

$$A = \frac{1}{8} \sum_8 \Delta = \frac{1}{8} (0 - 6 + 1 + 6 - 1 - 7 - 1 + 5) = -0,375$$

$$B = \frac{1}{2} (\Delta_e - \Delta_w) = \frac{1}{2} (1 + 1) = +1$$

$$C = \frac{1}{2}(\Delta n - \Delta s) = \frac{1}{2}(0 + 1) = +0,5$$

$$D = \frac{1}{4}(\Delta ne + \Delta sw - \Delta se - \Delta nw) = \frac{1}{4}(-6 - 7 - 6 - 5) = -6$$

$$E = \frac{1}{4}(\Delta n + \Delta s - \Delta e - \Delta w) = \frac{1}{4}(0 - 1 - 1 + 1) = -0,25$$

Compensación del desvío semicircular

$$\text{IT: } n = \frac{C}{Pr} = \frac{0,5}{0,25} = 2, \text{ rojo a estribor}$$

Se baja el IT de la casilla 18 a la 16, manteniendo la polaridad (rojo a babor).

$$\text{ILs: } n = \frac{B}{2Pr} = \frac{1}{0,5} = 2, \text{ rojos a proa}$$

Se sube la pareja de ILs de la casilla 12 a la 14, manteniendo la polaridad (rojos a proa).

Coefficientes D, E iniciales

En la tabla, se observa que la máxima distancia a la que se pueden encontrar las esferas de 152 mm del centro de la rosa es a 260 mm, que corresponde a $D = 2$.

Posición definitiva de las esferas

$$Dt = Di + Dr = 2 - 6 = -4 \quad E = -0,25$$

$$\tan 2\omega' = \frac{E}{D} = \frac{-0,25}{-4} = 0,063 \Rightarrow 2\omega' = S03,5W = 183,5 \Rightarrow \omega' = 91,75 \cong 92$$

92° respecto del través es lo mismo que 2° en sentido horario respecto de crujía.

$$\Delta c = D \cdot \sec 2\omega' = -4 \cdot (-1,002) = 4 \quad \left. \begin{array}{l} \varnothing = 152 \text{ mm} \\ \Delta c = 4 \end{array} \right\} \rightarrow d = 191 \text{ mm}$$

Solución: posición definitiva de los correctores

Un IT en la casilla 16, rojo a babor, y una pareja de ILs en las casillas 10 y 14, rojos a proa (o combinaciones equivalentes). Esferas de proa a popa, giradas 2° en sentido horario, y con sus puntos más próximos a la rosa a 191 mm de su centro.

Caso E: Ejercicio 26 (propio): A la vista de los desvíos obtenidos en el ejemplo anterior, se decide compensar únicamente el coeficiente D, para lo cual, no hace uso de la tabla, sino que arrumba al NEm y después al SWm. Explicar cómo se efectúa la compensación.

Solución:

Por los signos de los desvíos, se sabe que la varilla –a predomina sobre la –e. Si se acercan las esferas, la –a será aún mayor, y la –e, menor. Asimismo, dado que no se pueden alejar, hay que probar qué sucede quitándolas. En este caso, de acuerdo con los resultados del ejemplo anterior, el coeficiente D seguiría siendo negativo, y en consecuencia, las esferas se deben

instalar de proa a popa. Con las esferas ya colocadas de proa a popa, se arrumba al NEm, y se anula el desvío, quedando:

$$\left. \begin{aligned} \Delta ne = 0 = A + B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707 + D' \\ \Delta sw = A - B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 + D' \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta sw = 2A + 2D'$$

Pero si se desprecia el coeficiente A, resulta que:

$$\Delta sw = 2D' \Rightarrow D' = \frac{1}{2} \Delta sw$$

Por tanto, al SWm, se anula la mitad del desvío.

II.4.11. Coeficiente λ_2

Al compensar el desvío cuadrantal, se introducen hierros dulces (las esferas) que conllevan unos nuevos valores de las varillas a, e, los cuales son a_2, e_2 . Por tanto, la fuerza directriz media también se altera, siendo λ_2 su nuevo coeficiente:

$$\lambda_2 = 1 + \frac{1}{2}(a_2 + e_2)$$

Con la compensación, se anula el coeficiente D, resultando que:

$$D = \delta \cdot \csc l^\circ = 0 \Rightarrow \delta = \frac{a_2 - e_2}{2\lambda_2} = 0 \Rightarrow a_2 = e_2$$

En consecuencia,

$$\lambda_2 = 1 + \frac{1}{2}(e_2 + e_2) = 1 + e_2$$

Los valores de λ_2 suelen oscilar entre 0,95 y 0,75. Además, $\lambda_2 > \lambda$. (Moréu, 1987, p. 90)

En la Figura 34, se representan las varillas $-a, -e$ previas a la compensación, y las $-a_2, -e_2$ de después.

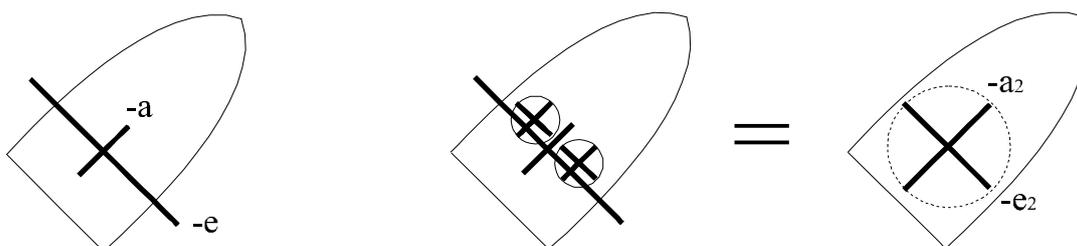


Figura 34. Varillas a, e antes y después de la compensación. Fuente: Propia.

Las varillas $-a_2, -e_2$ se comportan como una esfera concéntrica a la aguja, en la que: el hemisferio correspondiente a los rumbos magnéticos de componente N tiene polaridad roja, y el de los rumbos magnéticos de componente S, azul. Por consiguiente, estas varillas no producen ni desvíos ni alteraciones de la fuerza directriz a los diferentes rumbos, sino únicamente una disminución constante de la fuerza directriz a todos ellos.

Así pues, si no hay más elementos de los magnetismos permanente e inducido que las varillas $-a_2, -e_2$, la fuerza directriz queda homogeneizada tras la compensación. En consecuencia,

para obtener el coeficiente λ_2 , basta con determinar el periodo de la aguja en un lugar libre de perturbaciones magnéticas (T) y el periodo a un solo rumbo magnético (T'). Sin embargo, suelen quedar elementos magnéticos residuales, tal como lo ponen de manifiesto las curvas de los desvíos residuales, por cuanto λ_2 se obtiene igual que λ ; es decir: determinando los periodos a los cuatro rumbos magnéticos cardinales.

II.4.12. Tablilla de desvíos residuales y Certificado de compensación de agujas náuticas

La compensación debe ser efectuada por una persona con el Certificado de aptitud de compensador de agujas náuticas (compensador), y normalmente, la compensación preliminar resulta suficiente.

Después de realizarla, se toman los desvíos a los ocho rumbos principales. Con ellos, se calculan los coeficientes aproximados, y se comprueba que sus valores sean admisibles. Luego, se traza la curva de los desvíos residuales, a partir de la cual se pueden obtener los desvíos a más rumbos y plasmarlos en una tablilla con más valores que los ocho que se han tomado. Otra forma de confeccionar la tablilla, es mediante una hoja de cálculo como la del Ejercicio 8 (Tabla 5). En cualquier caso, ningún desvío residual debe superar el valor máximo establecido en la Norma ISO 25862; esto es: 3° en buques con una eslora de 82,5 m o más, y 4° en buques de eslora menor de 82,5 m.

Junto con la tablilla de los desvíos residuales, se extiende el Certificado de compensación de agujas náuticas, el cual debe tener el V°B° del Capitán o Patrón del buque y de la Administración (Capitán Marítimo en España). La Figura 140 corresponde al modelo español. Asimismo, en España, para la firma y sello del Capitán Marítimo, se requiere que el certificado y la tablilla hayan sido visados por el Colegio de Oficiales de la Marina Mercante Española (COMME), o en su defecto, se aporte un seguro de responsabilidad civil de la persona o empresa que realice la compensación, de conformidad con los artículos 3 y 4 de la Orden FOM/3479/2002, de 27 de diciembre, por la que se regula la firma y visado de documentos a que se refiere el Real Decreto 1837/2000, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Inspección y Certificación de Buques Civiles.

La validez del certificado es de dos años. El principal motivo por el que se debe volver a compensar es la variación del magnetismo permanente a lo largo del tiempo, incluyendo la posible pérdida de coercitividad de los imanes correctores (Moréu, 1987, pp. 78, 164). Además, hay que verificar la compensación siempre que: se hagan reformas estructurales considerables en un buque, o este haya estado amarrado más de seis meses a un mismo rumbo (Orden de 14 de diciembre de 1992 sobre compensación de agujas náuticas, apartado sexto, párrafo c).

II.5. Compensación definitiva

II.5.1. Efecto del cambio de latitud magnética sobre los desvíos

Los coeficientes $\alpha, \delta, \varepsilon$ son constantes, ya que solo dependen de las varillas y del coeficiente λ , que son invariables. Por el contrario, los coeficientes β, γ están en función de H, θ :

$$\beta = \frac{P}{\lambda \cdot H} + \frac{c}{\lambda} \cdot \tan \theta \quad \gamma = \frac{Q}{\lambda \cdot H} + \frac{f}{\lambda} \cdot \tan \theta$$

Al acercarse a los polos magnéticos, el valor de H disminuye, mientras que el de θ aumenta, y en consecuencia, los desvíos son mayores, tanto los causados por el magnetismo permanente (imanes P, Q) como los debidos al inducido (varillas c, f).

De la relación entre los coeficientes exactos y los aproximados de la fórmula práctica, se desprende que:

$$\begin{aligned} \sin A &= \frac{d-b}{2\lambda} & \sin B &= \frac{P}{\lambda \cdot H} + \frac{c}{\lambda} \cdot \tan \theta & \sin C &= \frac{Q}{\lambda \cdot H} + \frac{f}{\lambda} \cdot \tan \theta \\ \sin D &= \frac{a-e}{2\lambda} & \sin E &= \frac{d+b}{2\lambda} \end{aligned}$$

Por tanto, los desvíos constante y cuadrantal son invariables, mientras que el semicircular cambia con la latitud magnética. Además, los coeficientes variables se pueden expresar como la suma de sus dos partes: la debida a los imanes (B_p, C_q) y la debida a las varillas (B_c, C_f).

$$B = \left(\frac{P}{\lambda \cdot H} + \frac{c}{\lambda} \cdot \tan \theta \right) \cdot \csc 1^\circ = B_p + B_c ; \text{ donde } B_p = \frac{P}{\lambda \cdot H} \cdot \csc 1^\circ, B_c = \frac{c}{\lambda} \cdot \tan \theta \cdot \csc 1^\circ$$

$$C = \left(\frac{Q}{\lambda \cdot H} + \frac{f}{\lambda} \cdot \tan \theta \right) \cdot \csc 1^\circ = C_q + C_f ; \text{ donde } C_q = \frac{Q}{\lambda \cdot H} \cdot \csc 1^\circ, C_f = \frac{f}{\lambda} \cdot \tan \theta \cdot \csc 1^\circ$$

En las Figuras 35 y 36, se muestra de forma gráfica como varían los desvíos provocados por los imanes y las varillas verticales, y en la Figura 37, se aprecia como permanecen constantes los desvíos causados por las varillas horizontales (Gaztelu-Iturri, 1999, pp. 58–59).

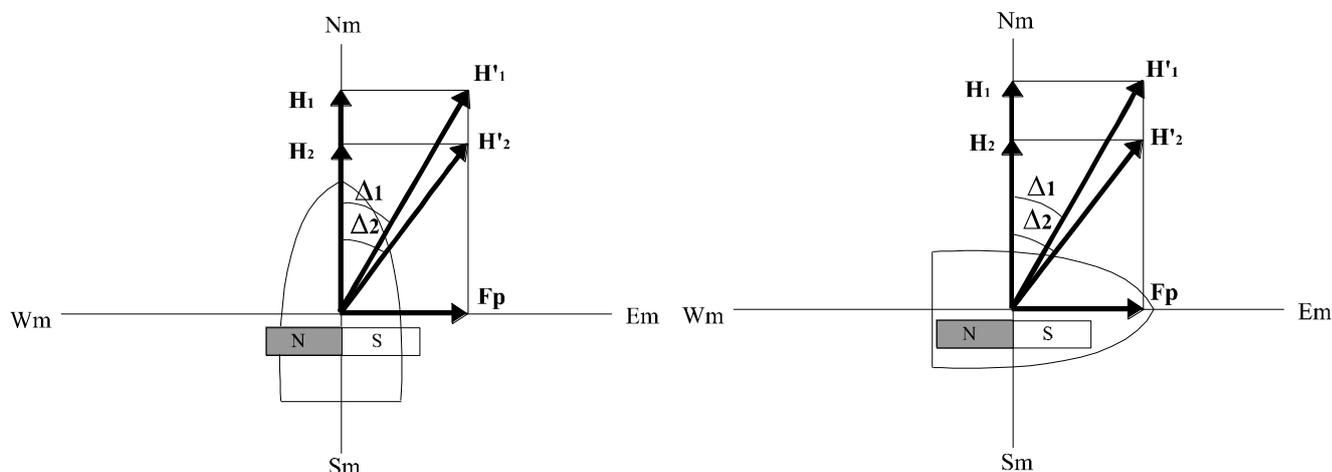


Figura 35. Efecto del cambio de latitud magnética sobre los desvíos causados por los imanes Q, P . Fuente: Propia.

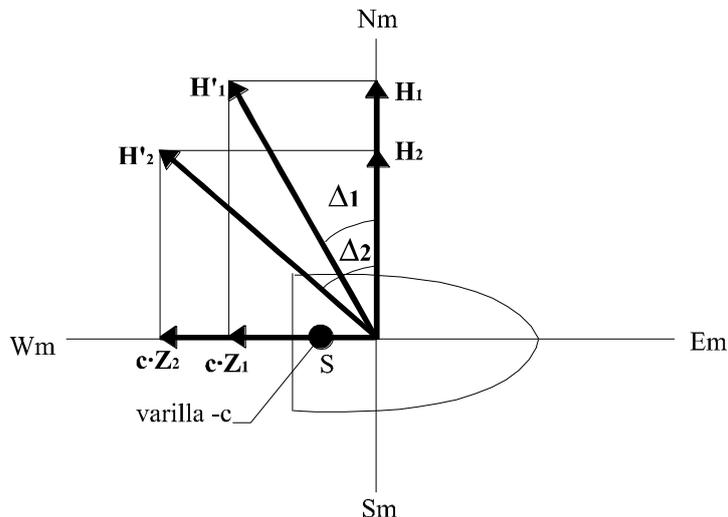


Figura 36. Efecto del cambio de latitud magnética sobre el desvío causado por una varilla vertical -c en el hemisferio N magnético. Fuente: Propia.

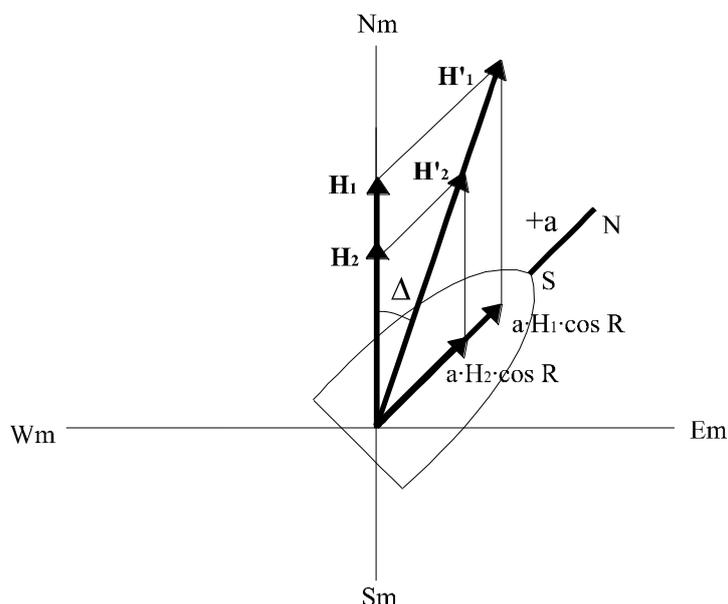


Figura 37. Desvío invariable causado por una varilla horizontal +a. Fuente: Propia.

Ejercicio 27 (propio): En Londres ($H = 1$; $Z = +2,4$) el desvío de un imán Q al rumbo de aguja N es de $+3,2^\circ$, y el de una varilla -c al rumbo de aguja E, de $-1,8^\circ$. Determinar cuáles serán los respectivos desvíos en Buenos Aires ($H = 1,2$; $Z = -0,7$) al rumbo de aguja SE.

Solución:

El desvío que provoca el imán Q es parte del coeficiente C. Por tanto, el desvío del imán Q es:

$$\Delta = Cq \cdot \cos R' = \frac{Q}{\lambda \cdot H} \cdot \csc I^\circ \cdot \cos R'$$

Luego, los desvíos de Q en dos lugares de diferente H y a diferentes rumbos, son:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{Q}{\lambda \cdot H_1} \cdot \csc I^\circ \cdot \cos R'_1 \\ \Delta_2 &= \frac{Q}{\lambda \cdot H_2} \cdot \csc I^\circ \cdot \cos R'_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{H_2 \cdot \cos R'_1}{H_1 \cdot \cos R'_2}$$

Con lo cual,

$$\Delta_2 = \frac{\Delta_1 \cdot H_1 \cdot \cos R'_2}{H_2 \cdot \cos R'_1} = \frac{3,2 \cdot 1 \cdot (-0,707)}{1,2 \cdot 1} = -1,9$$

El desvío que provoca la varilla $-c$ es parte del coeficiente B. Por tanto, su desvío es:

$$\Delta = Bc \cdot \sin R' = \frac{c}{\lambda} \cdot \tan \theta \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin R' = \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{Z}{H} \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin R'$$

Luego, los desvíos de la varilla $-c$ dos lugares de diferentes H, Z y a diferentes rumbos, son:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{Z_1}{H_1} \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin R'_1 \\ \Delta_2 &= \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{Z_2}{H_2} \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin R'_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{H_2 \cdot Z_1 \cdot \sin R'_1}{H_1 \cdot Z_2 \cdot \sin R'_2}$$

Con lo cual,

$$\Delta_2 = \frac{\Delta_1 \cdot H_1 \cdot Z_2 \cdot \sin R'_2}{H_2 \cdot Z_1 \cdot \sin R'_1} = \frac{-1,8 \cdot 1 \cdot (-0,7) \cdot 0,707}{1,2 \cdot 2,4 \cdot 1} = +0,3$$

II.5.2. Determinación de las dos partes de los coeficientes B, C dados dichos coeficientes en dos puntos de diferente latitud magnética

DETERMINACIÓN DE LAS DOS PARTES DEL COEFICIENTE B (Moréu, 1987, pp. 111–112)

Sean dos puntos de componentes H_1, Z_1 y H_2, Z_2 . El primero es el punto donde se efectuó la compensación preliminar, habiéndose obtenido un coeficiente B_1 a partir de los desvíos residuales tomados tras la compensación. Luego, en el segundo punto (con una latitud magnética notablemente distinta) es posible que aparezca un B_2 diferente del B_1 , debido a la varilla c . En tal caso, se trata de determinar qué parte del coeficiente B_2 se debe al imán P (Bp) y cuál a la varilla c (Bc).

Cuando se ha corregido el desvío cuadrantal, $\lambda = \lambda_2$. Entonces,

$$B \cdot \sin 1^\circ = \frac{P}{\lambda_2 \cdot H} + \frac{c}{\lambda_2} \cdot \frac{Z}{H} \Rightarrow P + c \cdot Z = \lambda_2 \cdot H \cdot B \cdot \sin 1^\circ$$

Particularizando para los dos puntos, se tiene:

$$P + c \cdot Z_1 = \lambda_2 \cdot H_1 \cdot B_1 \cdot \sin 1^\circ \quad (i)$$

$$P + c \cdot Z_2 = \lambda_2 \cdot H_2 \cdot B_2 \cdot \sin 1^\circ \quad (ii)$$

$$(i) - (ii) \Rightarrow c \cdot (Z_1 - Z_2) = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot (H_1 \cdot B_1 - H_2 \cdot B_2)$$

$$c = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{H_1 \cdot B_1 - H_2 \cdot B_2}{Z_1 - Z_2}$$

$$Z_2 \cdot (i) - Z_1 \cdot (ii) \Rightarrow P \cdot (Z_2 - Z_1) = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot (Z_2 \cdot H_1 \cdot B_1 - Z_1 \cdot H_2 \cdot B_2)$$

$$P = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{H_2 \cdot Z_1 \cdot B_1 - H_1 \cdot Z_2 \cdot B_2}{Z_2 - Z_1}$$

Por tanto,

$$B_c = c \cdot \frac{1}{\lambda_2} \cdot \frac{Z_2}{H_2} \cdot \csc 1^\circ = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{H_1 \cdot B_1 - H_2 \cdot B_2}{Z_1 - Z_2} \cdot \frac{1}{\lambda_2} \cdot \frac{Z_2}{H_2} \cdot \csc 1^\circ$$

$$B_c = \frac{(H_1 \cdot B_1 - H_2 \cdot B_2) \cdot Z_2}{(Z_1 - Z_2) \cdot H_2}$$

$$B_p = P \cdot \frac{1}{\lambda_2 \cdot H_2} \cdot \csc 1^\circ = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{Z_2 \cdot H_1 \cdot B_1 - Z_1 \cdot H_2 \cdot B_2}{Z_2 - Z_1} \cdot \frac{1}{\lambda_2 \cdot H_2} \cdot \csc 1^\circ$$

$$B_p = \frac{Z_2 \cdot H_1 \cdot B_1 - Z_1 \cdot H_2 \cdot B_2}{(Z_2 - Z_1) \cdot H_2}$$

Ejercicio 28 (Moréu, 1987, p. 113): Se efectuó una compensación preliminar en Bilbao ($H = 22,2 \mu\text{T}$; $Z = +38 \mu\text{T}$), y se determinó a partir de los desvíos residuales, $B_1 = -1$, así como $\lambda_2 = 0,9$. En Malabo (Guinea Ecuatorial), donde $H = 31 \mu\text{T}$; $Z = -9 \mu\text{T}$, se obtiene $B_2 = +3$. Calcular:

- B_p , B_c directamente; es decir: sin determinar los valores del imán P ni de la varilla c .
- Los valores del imán P y de la varilla c , y a partir de estos, B_p , B_c .

Solución:

i)

$$B_p = \frac{Z_2 \cdot H_1 \cdot B_1 - Z_1 \cdot H_2 \cdot B_2}{(Z_2 - Z_1) \cdot H_2} = \frac{-9 \cdot 22,2 \cdot (-1) - 38 \cdot 31 \cdot 3}{(-9 - 38) \cdot 31} = +2,29$$

$$B_c = \frac{(H_1 \cdot B_1 - H_2 \cdot B_2) \cdot Z_2}{(Z_1 - Z_2) \cdot H_2} = \frac{[22,2 \cdot (-1) - 31 \cdot 3] \cdot (-9)}{(38 + 9) \cdot 31} = +0,71$$

Como comprobación, nótese que $B_2 = B_p + B_c$

ii)

$$P = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{Z_2 \cdot H_1 \cdot B_1 - Z_1 \cdot H_2 \cdot B_2}{Z_2 - Z_1}$$

Siendo $\csc 1^\circ = 57,3$,

$$P = 0,9 \cdot \frac{1}{57,3} \cdot \frac{-9 \cdot 22,2 \cdot (-1) - 38 \cdot 31 \cdot 3}{-9 - 38} = +1,11 \mu\text{T}$$

$$B_p = \frac{P}{\lambda_2 \cdot H_2} \cdot \csc 1^\circ = \frac{1,11}{0,9 \cdot 31} \cdot 57,3 = +2,28$$

$$c = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{H_1 \cdot B_1 - H_2 \cdot B_2}{Z_1 - Z_2} = 0,9 \cdot \frac{1}{57,3} \cdot \frac{22,2 \cdot (-1) - 31 \cdot 3}{38 + 9} = -0,038$$

$$Bc = \frac{c}{\lambda_2} \cdot \frac{Z_2}{H_2} \cdot \csc 1^\circ = \frac{-0,038}{0,9} \cdot \frac{-9}{31} \cdot 57,3 = +0,70$$

Las diferencias con los resultados del apartado i) se deben a la precisión del cálculo.

El valor de las varillas es adimensional, pero el de los imanes se mide en unidades de campo magnético. En este caso, al estar las intensidades H, Z expresadas en microteslas, también el imán P se obtiene en microteslas.

Ejercicio 29 (propio): Expresar las intensidades H, Z del ejemplo anterior en unidades Gauss (u.G.), y calcular con ellas, los valores del imán P y de la varilla c.

Solución:

$$H_1 = 22,2 \mu\text{T} \cdot \frac{1 \text{ u.G.}}{18,5 \mu\text{T}} = 1,2 \text{ u.G.} \quad Z_1 = +2,05 \text{ u.G.} \quad H_2 = 1,68 \text{ u.G.} \quad Z_2 = -0,49 \text{ u.G.}$$

$$P = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{Z_2 \cdot H_1 \cdot B_1 - Z_1 \cdot H_2 \cdot B_2}{Z_2 - Z_1} = 0,9 \cdot \frac{1}{57,3} \cdot \frac{-0,49 \cdot 1,2 \cdot (-1) - 2,05 \cdot 1,68 \cdot 3}{-0,49 - 2,05} = +0,06 \text{ u.G.}$$

$$\text{Comprobación: } 0,06 \text{ u.G.} \cdot \frac{18,5 \mu\text{T}}{1 \text{ u.G.}} = 1,11 \mu\text{T}$$

$$c = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{H_1 \cdot B_1 - H_2 \cdot B_2}{Z_1 - Z_2} = 0,9 \cdot \frac{1}{57,3} \cdot \frac{1,2 \cdot (-1) - 1,68 \cdot 3}{2,05 + 0,49} = -0,039$$

Se comprueba que el valor de c es el mismo con independencia de la unidad empleada para expresar los componentes H, Z. El resultado de 0,039 en lugar de 0,038 se debe a la precisión del cálculo.

Ejercicio 30 (propio): Se efectuó una compensación preliminar en Londres (H = 1; Z = +2,4), y se obtuvieron los siguientes desvíos residuales:

$$\Delta n = +1 \quad \Delta e = 0 \quad \Delta s = -2 \quad \Delta se = 0 \quad \Delta s = +3 \quad \Delta sw = +1 \quad \Delta w = -1 \quad \Delta nw = 0$$

La posición de los imanes fue: una pareja de ILs en la casilla 12, rojos a proa, y un IT en la 8, rojo a babor.

Luego, se sustituyó la aguja de a bordo por una oscilante, y se cronometraron diez oscilaciones a cada uno de los cuatro rumbos de aguja cardinales, cuyas duraciones en segundos fueron:

$$T_n = 34 \quad T_e = 35 \quad T_s = 37 \quad T_w = 34$$

En tierra (en un lugar libre de perturbaciones magnéticas), la duración de las diez oscilaciones fue $T = 32 \text{ s}$.

A la llegada del buque a Buenos Aires (H = 1,2; Z = -0,7) se decide rectificar la compensación, y se obtienen los siguientes desvíos: $\Delta e = +2$, $\Delta w = -4$.

Calcular:

- i) Los coeficientes B_1 , λ_2 .
- ii) El coeficiente B_2 y la varilla c .
- iii) A partir de la varilla c , la parte Bc de B_2 .
- iv) Bp como la diferencia entre B_2 y Bc .
- v) La posición definitiva de los ILs.

Solución:

$$i) B_1 = \frac{1}{2}(\Delta e_1 - \Delta w_1) = \frac{1}{2}(-2 + 1) = -0,5$$

$$\frac{T^2}{T_n^2} = \frac{T^2}{T_w^2} = \frac{1024}{1156} = 0,886 \quad \frac{T^2}{T_e^2} = \frac{1024}{1225} = 0,836 \quad \frac{T^2}{T_s^2} = \frac{1024}{1369} = 0,748$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{4} \cdot \sum_4 \frac{T^2}{T^2} = \frac{1}{4}(0,886 + 0,886 + 0,836 + 0,748) = 0,839$$

$$ii) B_2 = \frac{1}{2}(\Delta e_2 - \Delta w_2) = \frac{1}{2}(2 + 4) = +3$$

$$c = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{H_1 \cdot B_1 - H_2 \cdot B_2}{Z_1 - Z_2} = 0,839 \cdot \frac{1}{57,3} \cdot \frac{1 \cdot (-0,5) - 1,2 \cdot 3}{2,4 + 0,7} = -0,019$$

$$iii) Bc = \frac{c}{\lambda_2} \cdot \frac{Z_2}{H_2} \cdot \csc 1^\circ = \frac{-0,019}{0,839} \cdot \frac{-0,7}{1,2} \cdot 57,3 = +0,76$$

$$iv) Bp = B_2 - Bc = 3 - 0,76 = +2,24$$

v) Hay que anular con imanes longitudinales solo la parte Bp del coeficiente B_2 .

Si se quiere calcular el número de casilla, es necesario determinar la potencia relativa de los imanes en el segundo punto, que de acuerdo con el epígrafe II.4.3, es:

$$Pr_2 = \frac{0,45}{H_2} = \frac{0,45}{1,2} = 0,375$$

Luego,

$$n = \frac{Bp}{2Pr} = \frac{2,24}{0,75} \cong 3, \text{ rojos a proa}$$

Puesto que hay una pareja en la casilla 12 con los rojos a proa, el casillero definitivo sería el 15, que no existe. Asimismo, si se quisieran utilizar imanes pequeños para corregir el Bp , habría que ponerlos en la casilla 12, junto con los grandes. Sin embargo, hay otras posibilidades, como: bajar la pareja de grandes a la casilla 11, y colocar una pareja de pequeños en la 16, todos ellos con los rojos a proa; o bien bajar la pareja de la 12 a la 8, y poner otra pareja de grandes en la 7. Esta última opción permite dejar los imanes más alejados de la aguja.

DETERMINACIÓN DE LAS DOS PARTES DEL COEFICIENTE C

La mayoría de buques no tienen varilla f, o bien su valor es muy pequeño. Esto se debe a que el plano de crujía lo es también de simetría, de modo que el efecto de la inducción vertical de la parte de babor es igual que el efecto de la de estribor, y ambos se contrarrestan. Por el contrario, el efecto de la inducción vertical de la parte de proa no es el mismo que el de la parte de popa, ya que la distribución de hierros es distinta, y por consiguiente, ambos efectos no se contrarrestan, con lo cual, surge una varilla c residual, que es la que crea la parte Bc del coeficiente B.

No obstante, si un buque no es simétrico, o su aguja no está en crujía, la distribución de hierros a babor y a estribor del compás no es igual, y en consecuencia, puede aparecer una varilla f. Por tanto, hay que considerar el caso genérico de que exista dicha varilla.

Haciendo un desarrollo análogo al del coeficiente B (Moréu, 1987, p. 113), resulta que:

$$Q = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{Z_2 \cdot H_1 \cdot C_1 - Z_1 \cdot H_2 \cdot C_2}{Z_2 - Z_1} \quad f = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{H_1 \cdot C_1 - H_2 \cdot C_2}{Z_1 - Z_2}$$

$$Cq = \frac{Z_2 \cdot H_1 \cdot C_1 - Z_1 \cdot H_2 \cdot C_2}{(Z_2 - Z_1) \cdot H_2} \quad Cf = \frac{(H_1 \cdot C_1 - H_2 \cdot C_2) \cdot Z_2}{(Z_1 - Z_2) \cdot H_2}$$

Ejercicio 31 (propio): En la compensación descrita en el Ejercicio 30, se obtienen los siguientes desvíos en Buenos Aires: $\Delta n = 0$, $\Delta s = 0$. Calcular: los coeficientes C_1 , C_2 ; la varilla f; la parte Cf del coeficiente C_2 ; la parte Cq como la diferencia entre C_2 y Cf, y la posición final del IT.

Solución:

$$C_1 = \frac{1}{2}(\Delta n_1 - \Delta s_1) = \frac{1}{2}(1 - 3) = -1 \quad C_2 = \frac{1}{2}(\Delta n_2 - \Delta s_2) = 0$$

$$f = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{H_1 \cdot C_1 - H_2 \cdot C_2}{Z_1 - Z_2} = \frac{0,839}{57,3} \cdot \frac{-1}{2,4 + 0,7} = -0,005$$

$$Cf = \frac{f}{\lambda_2} \cdot \frac{Z_2}{H_2} \cdot \csc 1^\circ = \frac{-0,005}{0,839} \cdot \frac{-0,7}{1,2} \cdot 57,3 = +0,2$$

$$Cq = C_2 - Cf = -0,2 \quad n = \frac{Cq}{Pr} = \frac{0,2}{0,375} \cong 1, \text{ rojo a babor}$$

Puesto que el IT está en la casilla 8 con el rojo a babor, se sube a la casilla 9, manteniendo la polaridad (rojo a babor).

II.5.3. Corrector de la varilla c: barra Flinders

En casi todos los buques, la varilla c es negativa, de forma que se anula introduciendo una c positiva. La varilla correctora se llama *barra Flinders*, y consiste en unos cilindros de hierro dulce (*trozos de la barra*) que se introducen en un tubo vertical (*estuche de la barra*), el cual está hecho de material antimagnético (generalmente latón) y queda fijo en la bitácora, a proa del compás. Casi todo el estuche queda por debajo de la rosa, aunque su extremo superior se encuentra ligeramente por encima de ella. La disposición del estuche a proa del compás y hacia abajo, hace que los hierros dulces introducidos en su interior, se comporten como una varilla c positiva. Asimismo, para que los trozos de la barra queden en la parte superior del estuche, se colocan otros trozos de madera (*suplementos*) en el fondo. Además, el estuche queda cerrado con un tapón, a fin de evitar la entrada de agua y humedad en su interior.

Para cada modelo de aguja, está tabulada la longitud de barra Flinders que se necesita para anular los distintos valores de la varilla c. A continuación, se muestra la tabla correspondiente a la aguja seca Thomson de 254 mm de diámetro, que es la que viene recogida en la Tabla XLVII de las Tablas náuticas españolas (T.N).

Varilla c	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16
Long (mm)	165	208	241	274	310	335	361	386	414	442	467	495	523	556	587	620

Tabla 7. Longitud de barra Flinders necesaria según la varilla c que debe anular. Fuente: T.N. Tabla XLVII, p. 302.

Así por ejemplo, para anular la varilla c obtenida en el Ejercicio 30 ($c = -0,019 \approx -0,02$ mm), se necesita una barra de 208 mm de longitud.

La barra Flinders tiene 76 mm de diámetro y 609 mm de largo, fraccionada en seis trozos, cuyas longitudes en milímetros son:

305 152 76 38 19 19

La distancia entre el fondo del estuche y el plano de la rosa es de 559 mm, y hay cinco suplementos, cuyas longitudes en milímetros son:

279 140 70 19 19

Con esta disposición, se consigue que el polo superior de la barra quede a la altura de la rosa. Dicho polo se encuentra del extremo superior de la barra, a 1/12 de su longitud, con lo cual, 1/12 de la longitud de la barra sobresale del plano de la rosa. Por este motivo, la parte superior del estuche queda más elevada que la rosa. Asimismo, el número de trozos empleados debe ser siempre el mínimo, con los más largos en la parte más alta.

También existe otro modelo de barra Flinders para bitácoras más pequeñas, de 51 mm de diámetro y 304 mm de longitud, fraccionada en cuatro trozos de: 152, 76, 38 y 38 mm.

(Moréu, 1987, p. 172)

Ejercicio 32 (Moréu, 1987, pp. 172–173): Determinar:

- i) Con qué trozos de barra se obtiene la longitud de 208 mm para anular la varilla c del Ejercicio 30.
- ii) Los suplementos necesarios para que el polo superior quede a la altura de la rosa.
- iii) La altura por encima o por debajo de la rosa a la que queda en la práctica el polo superior.

Solución:

$$i) 208 - 152 = 56; 56 - 38 = 18; 18 - 19 = -1$$

Se emplean los trozos de 152, 38 y 19 mm, sobrando 1 mm.

ii) Se trata de que el polo superior de la barra que vaya a quedar instalada en la bitácora (la de 209 mm en este caso) se encuentre a la altura de la rosa. La parte que tiene que quedar encima es $1/12$; esto es: $209/12 = 17$ mm. Luego, puesto que del fondo del estuche a la altura de la rosa hay 559 mm, los trozos de la barra más los suplementos deben medir $559 + 17 = 576$ mm. Así pues, $576 - 209 = 367$; $367 - 279 = 88$; $88 - 70 = 18$; $18 - 19 = -1$. Por tanto, se emplean los suplementos de 279, 70 y 19 mm, sobrando 1 mm.

iii) Dado que sobra 1 mm en la longitud total de los suplementos, el polo de la barra queda 1 mm más alto de lo deseado; es decir: 1 mm por encima del nivel de la rosa, lo cual es despreciable en la práctica.

. . .

Cuando se realiza la compensación preliminar, una práctica consiste en instalar la mitad de la barra Flinders (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 79). En tal caso, solo es necesario colocar el suplemento mayor y el trozo mayor. Pues: la mitad de la barra es $609/2 = 304,50 \approx 305$ mm, que corresponde al trozo mayor; luego, la parte que tiene que quedar por encima de la rosa es $305/12 = 25$ mm, de manera que el trozo de 305 mm más los suplementos, tienen que medir $559 + 25 = 584$ mm, con lo cual, $584 - 305 = 279$ mm, que corresponde al suplemento mayor.

II.5.4. Compensación de la varilla f : giro de la barra Flinders

En los buques con una varilla f apreciable, esta se puede anular colocando otra f de signo contrario, la cual quedaría sobre la línea del través que pasa por el centro de la rosa. No obstante, de forma análoga a lo que sucede con las esferas, la barra Flinders es capaz de contrarrestar, tanto la varilla c , como la f . En la Figura 38, se muestra como esto se consigue con una barra de valor $\sqrt{c^2 + f^2}$ y girada un ángulo ω'' tal que $\tan \omega'' = f/c$.

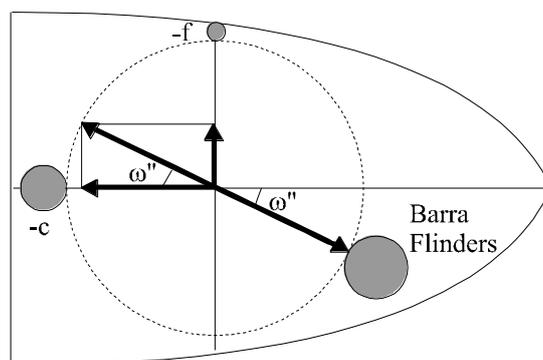


Figura 38. Giro de la barra Flinders para anular simultáneamente las varillas c, f. Fuente: Propia.

Si la varilla f es positiva, la barra se debe girar el ángulo ω'' respecto de la posición en que anula la varilla c (a proa o a popa del compás), pero de forma que quede a babor de la rosa, ya que: una varilla f a babor y hacia abajo, es negativa, y en consecuencia, compensa la f positiva. Por el contrario, si la varilla f es negativa, hay que dejar la barra a estribor del compás. Así pues: cuando las dos varillas c, f son positivas, la barra queda a popa y a babor; cuando c es positiva, pero f negativa, la barra queda a popa y a estribor; cuando c es negativa, pero f positiva, la barra queda a proa y a babor, y cuando ambas varillas son negativas, la barra queda a proa y a estribor.

(Moréu, 1987, pp. 193–194)

De forma análoga al estudio del desvío semicircular (epígrafe II.2.3), se tiene:

$$\tan \omega'' = \frac{f}{c} \Rightarrow \frac{\sin^2 \omega''}{\cos^2 \omega''} = \frac{f^2}{c^2} \Rightarrow \dots \Rightarrow c^2 \cdot \sec^2 \omega'' = c^2 + f^2$$

Considerando ω'' como una marcación de 0 a 360¹³, resulta que el valor de $c \cdot \sec \omega''$ siempre es negativo, y por consiguiente, la raíz de $c^2 + f^2$ es negativa: $c \cdot \sec \omega'' = -\sqrt{c^2 + f^2}$

Esto se debe a que: en los cuadrantes I y IV, la varilla c es negativa, pero la secante es positiva; mientras que en los cuadrantes II y III, la varilla es positiva, pero la secante, negativa.

Ejercicio 33 (propio): En los Ejercicios 30 y 31, se obtuvo $c = -0,019$; $f = -0,005$. Determinar la longitud de barra necesaria, y el ángulo que debe estar girada.

Solución:

$$\tan \omega'' = \frac{f}{c} = \frac{-0,005}{-0,019} = 0,263 \Rightarrow \omega'' = N14,5E = 14,5 \text{ a estribor (E) desde proa (N)}$$

$$\sqrt{c^2 + f^2} = -c \cdot \sec \omega'' = 0,019 \cdot \sec 14,5 = 0,019 \cdot 1,033 = 0,02 \rightarrow \text{Barra Flinders: 208 mm}$$

¹³ Para determinar esta marcación, el ángulo ω'' se debe obtener como si se tratara de un rumbo cuadrantal, de forma que las denominaciones N, E (proa, estribor) correspondan a los valores negativos de las varillas, mientras que las S, W (popa, babor), a los positivos; es decir: al revés de lo que sucede con los ángulos ω , ω' .

Ejercicio 34 (propio): Determinar el valor de las varillas c, f que anula una barra Flinders de 457 mm a popa del compás y girada 54° a estribor.

Solución:

$$\text{Barra Flinders: } 457 \text{ mm} \rightarrow \sqrt{c^2 + f^2} \cong 0,11 \quad \omega'' = 54 \text{ a estribor desde popa} = S54E = 126$$

$$c = -\sqrt{c^2 + f^2} \cdot \cos \omega'' = -0,11 \cdot \cos 126 = -0,11 \cdot (-0,588) = +0,065$$

$$f = c \cdot \tan \omega'' = -\sqrt{c^2 + f^2} \cdot \cos \omega'' \cdot \tan \omega'' = -\sqrt{c^2 + f^2} \cdot \sin \omega''$$

$$f = -0,11 \cdot \sin 126 = -0,11 \cdot 0,809 = -0,089$$

Ejercicio 35 (propio): Un buque salió de Bilbao (H = 22,2 μ T; Z = +38 μ T) con los siguientes correctores instalados: un IT en las casillas 6 y 7, rojos a estribor; una pareja de ILs en las casillas 6 y 10, rojos a popa, y 381 mm de barra Flinders a proa del compás, girada 30° a babor. Los desvíos a los rumbos cardinales fueron: $\Delta n = 0$, $\Delta e = -1$, $\Delta s = -1$, $\Delta w = +3$. $\lambda_2 = 0,9$. Cuando llega a Malabo (H = 31 μ T; Z = -9 μ T) obtiene los siguientes desvíos: $\Delta n = -3$, $\Delta e = +6$, $\Delta s = +1$, $\Delta w = -4$, y se dispone a rectificar la compensación. Determinar la posición definitiva de los correctores del desvío semicircular.

Solución:

Coefficientes B, C en los dos puntos

$$B_1 = \frac{1}{2}(\Delta e_1 - \Delta w_1) = \frac{1}{2}(-1 - 3) = -2 \quad C_1 = \frac{1}{2}(\Delta n_1 - \Delta s_1) = \frac{1}{2}(0 + 2) = +1$$

$$B_2 = \frac{1}{2}(\Delta e_2 - \Delta w_2) = \frac{1}{2}(6 + 4) = +5 \quad C_2 = \frac{1}{2}(\Delta n_2 - \Delta s_2) = \frac{1}{2}(-3 - 1) = -2$$

Varillas c, f iniciales (las que anula la barra instalada)

$$\text{Barra Flinders: } 381 \text{ mm} \rightarrow \sqrt{c^2 + f^2} \cong 0,08 \quad \omega'' = 30 \text{ a babor desde proa} = N30W = 330$$

$$c = -\sqrt{c^2 + f^2} \cdot \cos \omega'' = -0,08 \cdot \cos 330 = -0,08 \cdot 0,866 = -0,069$$

$$f = -\sqrt{c^2 + f^2} \cdot \sin \omega'' = -0,08 \cdot \sin 330 = -0,08 \cdot (-0,5) = +0,04$$

Varillas c, f residuales, y partes Bc, Bp, Cf, Cq

$$c = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{H_1 \cdot B_1 - H_2 \cdot B_2}{Z_1 - Z_2} = \frac{0,9}{57,3} \cdot \frac{22,2 \cdot (-2) - 31 \cdot 5}{38 + 9} = -0,067$$

$$f = \lambda_2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \frac{H_1 \cdot C_1 - H_2 \cdot C_2}{Z_1 - Z_2} = \frac{0,9}{57,3} \cdot \frac{22,2 \cdot 1 - 31 \cdot (-2)}{38 + 9} = +0,028$$

$$Bc = \frac{c}{\lambda_2} \cdot \frac{Z_2}{H_2} \cdot \csc 1^\circ = \frac{-0,067}{0,9} \cdot \frac{-9}{31} \cdot 57,3 = +1,24 \quad Bp = B_2 - Bc = 5 - 1,24 = +3,76$$

$$C_f = \frac{f}{\lambda_2} \cdot \frac{Z_2}{H_2} \cdot \csc 1^\circ = \frac{0,028}{0,9} \cdot \frac{-9}{31} \cdot 57,3 = -0,52 \quad C_q = C_2 - C_f = -2 + 0,52 = -1,48$$

Posición definitiva de los imanes

Puesto que H está expresada en microteslas,

$$Pr_2 = \frac{8,325}{H_2} = \frac{8,325}{31} = 0,269$$

$$\text{ILs: } n = \frac{B_p}{2Pr} = \frac{3,76}{0,538} \cong 7, \text{ rojos a proa}$$

Pero hay una pareja de ILs en las casillas 6 y 10, rojos a popa. Luego, se quitan los de la 6, y se bajan los de la 10 a la 9, manteniendo la polaridad (rojos a popa).

$$\text{IT: } n = \frac{C_q}{Pr} = \frac{1,48}{0,269} \cong 6, \text{ rojo a babor}$$

Puesto que hay un IT en las casillas 6 y 7 con el rojo a estribor, se quita el de la 6.

Varillas c, f totales, y posición definitiva de la barra

$$c_t = c_i + c_r = -0,069 - 0,067 = -0,136 \quad f_t = f_i + f_r = 0,04 + 0,028 = +0,068$$

$$\tan \omega'' = \frac{f}{c} = \frac{0,068}{-0,136} = -0,5 \Rightarrow \omega'' = N26,5W = 333,5 = 26,5 \text{ a babor desde proa}$$

$$\sqrt{c^2 + f^2} = -c \cdot \sec \omega'' = 0,136 \cdot \sec 333,5 = 0,136 \cdot 1,117 = 0,152 \rightarrow \text{Barra Flinders: } 587 \text{ mm}$$

Desglose de la barra: $587 - 305 = 282$; $282 - 152 = 130$; $130 - 76 = 54$; $54 - 38 = 16$; $16 - 19 = -3$. Es decir: se emplean todos los trozos, excepto uno de 19 mm.

Suplementos necesarios: la barra que se instala tiene 3 mm más que la teórica, o sea, que mide 590 mm. Luego, $590/12 = 49$ mm, con lo cual, $559 + 49 = 608$; $608 - 590 = 18$. Así pues, se coloca un solo suplemento de 19 mm, quedando el polo 1 mm por encima de la rosa.

Solución: posición definitiva de los correctores del desvío semicircular

Una pareja de ILs en la casilla 9, rojos a popa; un IT en la casilla 7, rojo a estribor; barra Flinders a proa del compás, girada $26,5^\circ$ a babor, con todos sus trozos, excepto uno de 19 mm, y un suplemento de 19 mm.

II.5.5. Compensación en el ecuador magnético

En el ecuador magnético, donde $Z = 0$, todo el desvío semicircular se debe a los imanes P, Q, ya que las varillas c, f no se inducen. Así pues, anulando solo con imanes los coeficientes B, C, se compensa el magnetismo permanente. Luego, en otra latitud magnética que diste notablemente del ecuador, se corrige todo el desvío semicircular que aparezca únicamente con

la barra Flinders. Asimismo, puesto que de forma habitual, $B = B_p + B_c$, pero $C = C_q$, solo se aplica el método para rectificar la compensación del coeficiente B. (Moréu, 1987, pp. 190–191) Este método tiene la ventaja de que se puede llevar a cabo a tanteo, sin necesidad de conocer las fuerzas H, Z, pues la precisión de la carta de la Figura 14 es suficiente para determinar aproximadamente en qué punto de la derrota se cruza el ecuador magnético. Además, si se procede a tanteo, tampoco es necesario conocer λ_2 .

Ejercicio 36 (propio): Un barco tiene instalada la mitad de su barra Flinders (305 mm) a proa del compás, así como una pareja de ILs en la casilla 14, rojos a proa. En un punto del ecuador magnético donde $H = 1,8$, obtuvo $\Delta e = +6$. Anuló este desvío, y a continuación, arrumbó al Wm, observando $\Delta w = +2$. En otro punto de $H = 1,1$; $Z = +0,8$; toma $\Delta e = +2$ y $\Delta w = -3$. Determinar la posición definitiva de los ILs y la longitud de la barra, sabiendo que tras la compensación preliminar, $\lambda_2 = 0,833$.

Solución:

Posición de los imanes en el ecuador magnético

$$Pr = \frac{0,45}{H} = \frac{0,45}{1,8} = 0,25$$

$$ILs: n = \frac{\Delta e}{2Pr} = \frac{6}{0,5} = 12, \text{ rojos a proa}$$

Luego, queda una pareja de ILs en las casillas 14 y 12 con los rojos a proa. Además, se tiene:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta e = 0 = A + B' - E \\ \Delta w = 2 = A - B' - E \end{array} \right\} \Rightarrow -2 = 2B' \Rightarrow B' = -1$$

$$ILs: n = \frac{B'}{2Pr} = \frac{1}{0,5} = 2, \text{ rojos a popa}$$

Se baja la pareja de ILs de la casilla 12 a la 10, quedando una pareja en la casilla 14 y otra en la 10, ambas con los rojos a proa.

Ajuste de la barra en el segundo punto

Barra Flinders: 305 mm a proa del compás $\rightarrow c \cong -0,05$

$$B_2 = B_c = \frac{1}{2}(\Delta e - \Delta w) = \frac{1}{2}(2 + 3) = +2,5$$

$$B_c = \frac{c}{\lambda_2} \cdot \frac{Z_2}{H_2} \cdot \csc 1^\circ \Rightarrow c = \frac{B_c \cdot \lambda_2 \cdot H_2}{Z_2 \cdot \csc 1^\circ} = \frac{2,5 \cdot 0,833 \cdot 1,1}{0,8 \cdot 57,3} = +0,05$$

La varilla c resultante es nula. Por tanto, no se coloca la barra, debiéndose retirar el trozo de 305 mm que está instalado.

II.5.6. Rumbo de grada

DEFINICIÓN (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 69).

El rumbo de grada (R_g) de un buque es el rumbo magnético al cual se construyó.

COLOCACIÓN DE LA BARRA FLINDERS AL RUMBO DE GRADA O A SU OPUESTO (Gaztelu-Iturri, 1999, pp. 69–70)

Durante la construcción de un buque, el magnetismo terrestre va induciendo sus hierros duros. Este efecto se traduce en la formación de dos imanes: uno vertical y otro horizontal; este segundo, en la dirección de H. Por tanto, al R_g y a su opuesto, el desvío causado por el magnetismo permanente horizontal (imanes P, Q) es nulo, ya que la dirección del imán resultante es la misma que H, y por tanto, el único efecto de dicho imán es aumentar o disminuir la fuerza directriz.

Después de anular el coeficiente D, y considerando que A, E = 0, resulta que:

$$\Delta = B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R'$$

De forma habitual, $B = B_p + B_c$, $C = C_q$. En consecuencia,

$$\Delta = B_p \cdot \sin R' + B_c \cdot \sin R' + C_q \cdot \cos R'$$

Pero al R_g y a su opuesto, $B_p = C_q = 0$. Luego,

$$\Delta_g = B_c \cdot \sin R_g$$

Aproando al R_g o a su opuesto, se puede compensar la varilla c, bien sea anulando el desvío a tanteo con la barra Flinders, o bien calculando el valor de dicha varilla y acudiendo a la tabla:

$$\Delta_g = B_c \cdot \sin R_g \Rightarrow B_c = \Delta_g / \sin R_g$$

$$B_c = \frac{c}{\lambda_2} \cdot \frac{Z}{H} \cdot \csc 1^\circ \Rightarrow c = \frac{B_c \cdot \lambda_2 \cdot H}{Z \cdot \csc 1^\circ} = \frac{\Delta_g \cdot \lambda_2 \cdot H}{Z \cdot \sin R_g \cdot \csc 1^\circ}$$

Por consiguiente, se puede anular la varilla c en el mismo lugar donde se efectúe la compensación preliminar; es decir: se pueden colocar todos los correctores en un mismo sitio.

DETERMINACIÓN DE B_p , B_c CONOCIENDO EL RUMBO DE GRADA, PERO SIN NECESIDAD DE ARRUMBAR A ÉL O A SU OPUESTO. (Moréu, 1987, pp. 113–118)

El desvío provocado por el magnetismo permanente es:

$$\Delta = B_p \cdot \sin R' + C_q \cdot \cos R'$$

Sea $\tan \omega''' = C_q / B_p$, donde el cuadrante de ω''' se obtiene como el de los ángulos ω , ω' .

Luego, haciendo un desarrollo análogo al efectuado en el estudio del desvío semicircular (epígrafe II.2.3), la expresión de arriba se transforma en:

$$\Delta = B_p \cdot \sec \omega''' \cdot \sin(R' + \omega''') = \sqrt{B_p^2 + C_q^2} \cdot \sin(R' + \omega''')$$

Cuando $\sin(R'+\omega''')=0$, el magnetismo permanente no causa desvío, y esto sucede a dos rumbos:

$$\sin(R'+\omega''')=0 \Rightarrow \begin{cases} R'+\omega'''=360 \Rightarrow R'=360-\omega''' \\ R'+\omega'''=180 \Rightarrow R'=180-\omega''' \end{cases}$$

Estos dos rumbos son el Rg y su opuesto. Para determinar cuál de los dos es el Rg, sirva el siguiente razonamiento:

Cuando el Rg tiene componente N, el magnetismo terrestre crea un imán P con el N a proa y el S a popa, y por tanto, P es negativo. Por el contrario, si el Rg tiene componente S, el imán P es positivo. Asimismo, cuando P y Q son ambos positivos, el ángulo ω''' pertenece al primer cuadrante. Entonces, $360-\omega'''$ pertenece al cuarto, y en consecuencia, tiene componente N. Luego, $360-\omega'''$ no puede ser el Rg, sino que el Rg es $180-\omega'''$. Por tanto,

$$Rg = 180 - \omega''' \Rightarrow \omega''' = 180 - Rg \Rightarrow \tan(180 - Rg) = \frac{Cq}{Bp} \Rightarrow \tan Rg = -\frac{Cq}{Bp}$$

Pero normalmente, $Cq = C$, con lo cual,

$$\tan Rg = -\frac{C}{Bp} \Rightarrow Bp = -C \cdot \cot Rg$$

Esta expresión permite determinar los valores de Bp, Bc ($Bc = B - Bp$), y por consiguiente, también hace posible la colocación de todos los correctores en el mismo lugar.

Cabe señalar por último, que el magnetismo permanente cambia paulatinamente, de forma que al cabo de unos años de vida del buque, los rumbos a los que los imanes P, Q no causan desvío, dejan de ser el Rg y su opuesto. No obstante, cuando en un barco nuevo, se le ha instalado la longitud adecuada de barra Flinders, no es necesario volver a modificar esta longitud, ya que la varilla c no tiene por que cambiar (igual que las varillas a, e), a menos que: se hayan efectuado reformas estructurales que alteren significativamente la forma del buque, o se hayan colocado hierros próximos al compás, como por ejemplo, soportes de antenas.

Ejercicio 37 (propio): Tras la botadura de un buque construido al Rg = N30W, se procede a su compensación. No hay instalado ningún corrector, y en tierra, se tomó el periodo de la aguja, siendo $T = 16,5$ s. Se arrumba al NWm y después al SEm, observando $\Delta_{nw} = -9,5$; $\Delta_{se} = -6,5$. Luego, se anula el coeficiente D, suponiendo que $A = 0$, y a continuación, se siguen los rumbos cardinales, donde se toman los siguientes desvíos y periodos de la aguja:

$$\Delta_n = -9 \quad \Delta_e = -13 \quad \Delta_s = +11 \quad \Delta_w = +11 \quad T_n = 17 \quad T_e = 19,5 \quad T_s = 18 \quad T_w = 18$$

En este lugar, $Pr = 1/3$, $\theta = -60^\circ$. Determinar la posición de los correctores.

Solución:

Cálculo y anulación del coeficiente D

$$\left. \begin{aligned} \Delta n_w = -9,5 &= A - B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707 - D \\ \Delta s_e = -6,5 &= A + B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 - D \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta n_w + \Delta s_e = -16 = 2A - 2D = -2D \Rightarrow D = +8$$

Como se indicó en el epígrafe II.4.7, para anular un $D = 8^\circ$, las esferas más adecuadas son las de 191 mm de diámetro, cuyos puntos más próximos a la rosa deben quedara a 170 mm de su centro.

Cálculo de los coeficientes B, C, λ_2

$$B = \frac{1}{2}(\Delta e - \Delta w) = \frac{1}{2}(-13 - 11) = -12 \quad C = \frac{1}{2}(\Delta n - \Delta s) = \frac{1}{2}(-9 - 11) = -10$$

Cuando se ha anulado el coeficiente D, las varillas a , e resultantes (las propias del buque y las de las esferas) son a_2 , e_2 . En consecuencia, el coeficiente de la fuerza directriz media es λ_2 , aunque no se hayan anulado los otros coeficientes. Además, puesto que no se trata de desvíos residuales, sino de desvíos grandes, hay que considerar $\cos \Delta$ para calcular λ_2 . Así pues,

$$\frac{T^2}{T_n^2} \cdot \cos \Delta n = \frac{272,25}{289} \cdot 0,988 = 0,931 \quad \frac{T^2}{T_e^2} \cdot \cos \Delta e = \frac{272,25}{380,25} \cdot 0,974 = 0,697$$

$$\frac{T^2}{T_s^2} \cdot \cos \Delta s = \frac{T^2}{T_w^2} \cdot \cos \Delta s = \frac{272,25}{324} \cdot 0,982 = 0,825$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{4} \cdot \sum_4 \frac{T^2}{T_i^2} = \frac{1}{4}(0,931 + 0,697 + 0,825 + 0,825) = 0,82$$

Cálculo de las dos partes del coeficiente B

$$B_p = -C \cdot \cot R_g = 10 \cdot (-1,732) = -17,32$$

$$B_c = B - B_p = -12 + 17,32 = +5,32$$

Compensación del desvío semicircular

$$ILs: n = \frac{B_p}{2Pr} = \frac{17,32}{2/3} = 26, \text{ rojos a popa}$$

Una posible combinación es: una pareja en la casilla 14 y otra en la 12, rojos a popa.

$$IT: n = \frac{C}{Pr} = \frac{10}{1/3} = 30, \text{ rojos a babor}$$

En este caso, se puede colocar un IT en la casilla 16 y otro en la 14, rojos a babor.

Barra Flinders:

$$B_c = \frac{c}{\lambda_2} \cdot \tan \theta \cdot \csc 1^\circ \Rightarrow c = \frac{B_c \cdot \lambda_2 \cdot \cot \theta}{\csc 1^\circ} = \frac{5,32 \cdot 0,82 \cdot (-0,577)}{57,3} = -0,044$$

$$c \cong -0,04 \rightarrow \text{Barra Flinders: 274 mm a proa del compás}$$

$$274 - 152 = 122; 122 - 76 = 46; 46 - 38 = 8; (8 - 19 = -11)$$

Hay dos posibilidades: que falten 8 mm de barra o que sobren 11. Pero debido al redondeo de c para entrar en la tabla, la longitud de 274 mm es menor que la correspondiente a la varilla calculada, de forma que se opta por el exceso de 11 mm. Por consiguiente, los trozos a instalar son los de: 152, 76, 38 y 19 mm. Esto hace una longitud total de 285 mm. Luego, $285/12 = 24$; $559 + 24 = 583$; $583 - 285 = 298$; $298 - 279 = 19$. Por tanto, los suplementos son los de 279 y 19 mm.

Varillas d, b

$$\left. \begin{array}{l} \Delta n = -9 = A + C + E \\ \Delta s = 11 = A - C + E \\ \Delta e = -13 = A + B - E \\ \Delta w = 11 = A - B - E \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} 2 = 2A + 2E \\ -2 = 2A - 2E \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 0 = 4A \Rightarrow A = 0 \\ 4 = 4E \Rightarrow E = +1 \end{array} \right.$$

En la mayoría de bitácoras, las esferas no se pueden girar, pero aunque en este caso fuera posible, la pequeñez de E no lo requiere.

Posición definitiva de los correctores

Una pareja de ILs en las casillas 12 y 14, rojos a popa, y un IT en las casillas 14 y 16, rojos a babor (o combinaciones equivalentes). Esferas de 191 mm de diámetro, de babor a estribor, y con sus puntos más próximos a la rosa a 170 mm de su centro. Trozos de 152, 76, 38 y 19 mm de barra Flinders, con los suplementos de 279 y 19 mm.

Ejercicio 38 (Moréu, 1987, p. 117): El magnetismo permanente de un buque provoca un desvío máximo de -5° al rumbo de aguja 143. Calcular: el Rg; las partes Bp, Cq, y el desvío causado por dicho magnetismo a rumbo de aguja 270.

Solución:

Al 143, se debe cumplir que: $\sin(R'+\omega''') = -1$. Luego,

$$143 + \omega''' = 270 \Rightarrow \omega''' = 270 - 143 = 127 = S53E$$

$$R_g = 180 - \omega''' = 180 - 127 = 053 = N53E$$

También se debe cumplir que: $\sqrt{Bp^2 + Cq^2} = 5$. Por tanto,

$$\sqrt{Bp^2 + Cq^2} = Bp \cdot \sec \omega''' = 5 \Rightarrow Bp = 5 \cdot \cos \omega''' = 5 \cdot (-0602) = -3$$

Asimismo,

$$\tan \omega''' = \frac{Cq}{Bp} \Rightarrow Cq = Bp \cdot \tan \omega''' = \sqrt{Bp^2 + Cq^2} \cdot \cos \omega''' \cdot \tan \omega''' = \sqrt{Bp^2 + Cq^2} \cdot \sin \omega'''$$

$$Cq = 5 \cdot 0,799 = +4$$

$$\Delta = \sqrt{Bp^2 + Cq^2} \cdot \sin(R'+\omega''') \Rightarrow \Delta(270) = 5 \cdot \sin(270+127) = 5 \cdot \sin 37 = 5 \cdot 0,602 = +3$$

LIMITACIÓN EN EL EMPLEO DEL RUMBO DE GRADA (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 73)

Hoy día, muchos buques se construyen por secciones, adoptando cada una de ellas una orientación distinta respecto del meridiano magnético. Por tanto, después del ensamblaje, no se conoce la dirección del imán barco, y en consecuencia, desaparece el concepto de R_g .

II.6. Desvío de escora

II.6.1. Introducción

En los capítulos anteriores, se consideró que el buque estaba adrizado. En este, se analizará el caso en que está escorado.

Con los balances, la rosa permanece horizontal, debido a la suspensión cardán. Asimismo, el imán P y la fuerza inductora X tampoco se ven afectados por la escora, pero los imanes Q, R y las fuerzas Y, Z adquieren una inclinación con respecto al plano de la rosa. La incidencia de los imanes y de las varillas es distinta con el buque escorado que adrizado, aunque la diferencia no solo está entre las situaciones de adrizado y escorado, sino entre las distintas escoras; es decir: el campo magnético resultante que afecta a la aguja, tiene una dirección diferente para cada escora concreta, y por tanto, el N de la aguja cambia con la escora, lo que se traduce en una oscilación o *baile* de la aguja. Cuanto mayor sea dicha oscilación, más difícil resulta mantener el rumbo, hasta llegar al extremo de que no se pueda gobernar con el compás magnético. Por consiguiente, se trata de eliminar la oscilación de la aguja.

Sea Δ el desvío a un determinado rumbo de aguja, con el barco adrizado, y Δ_i , el desvío a este mismo rumbo cuando el barco tiene una escora i . Luego, se define el desvío de escora, expresado Δ_e (no confundirlo con el desvío al E), como:

$$\Delta_e = \Delta_i - \Delta$$

Asimismo, para el estudio del desvío con el buque escorado (Δ_i), se considera que: los balances se producen alrededor del eje longitudinal que pasa por el centro de la rosa; las escoras a estribor son positivas, y a babor, negativas.

(Moréu, 1987, pp. 139, 146, 181)

II.6.2. Imanes y varillas

Cuando el buque adquiere una escora i , las fuerzas de los imanes Q, R se descomponen, según los ejes transversal y vertical a la rosa, en las fuerzas transversales $Q \cdot \cos i$, $-R \cdot \sin i$, y en las verticales $Q \cdot \sin i$, $R \cdot \cos i$.

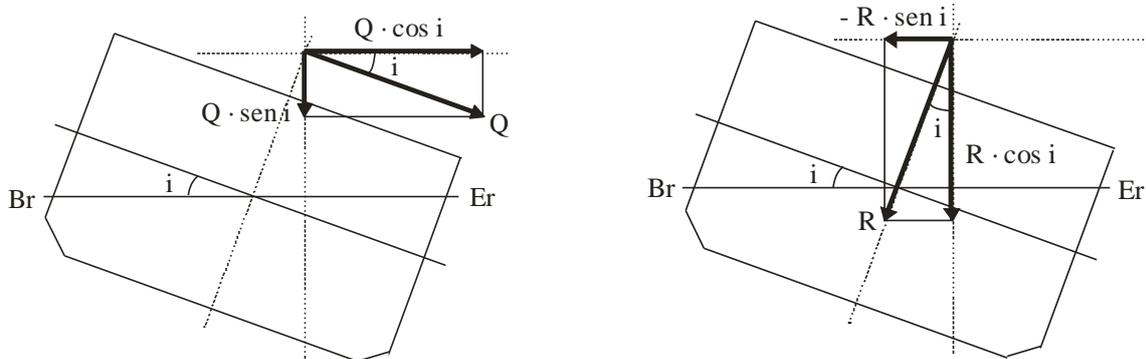


Figura 39. Descomposición de Q, R en el plano transversal. Fuente: Propia.

Luego, los nuevos valores de P, Q, R son:

$$\begin{aligned} P_i &= P \\ Q_i &= Q \cdot \cos i - R \cdot \sin i \\ R_i &= R \cdot \cos i + Q \cdot \sin i \end{aligned}$$

Asimismo, las fuerzas inductoras Y, Z se descomponen, según los ejes propios del buque, en las transversales $Y \cdot \cos i$, $Z \cdot \sin i$, y en las verticales $-Y \cdot \sin i$, $Z \cdot \cos i$.

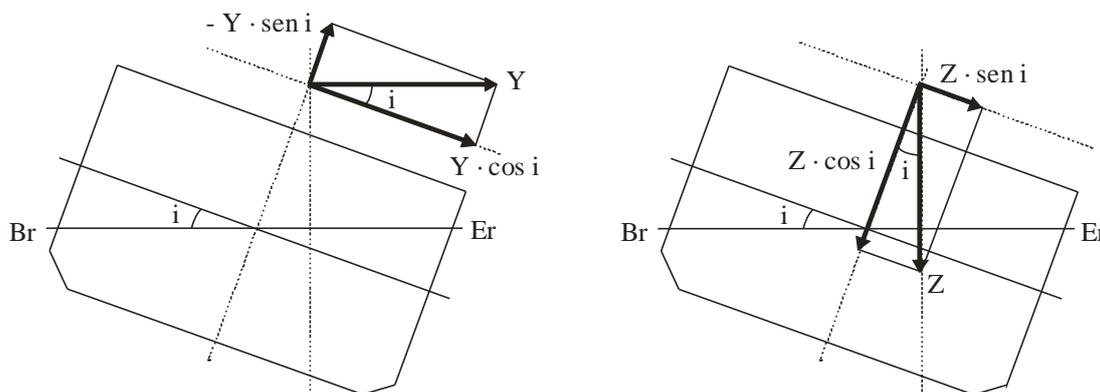


Figura 40. Descomposición de Y, Z en el plano transversal. Fuente: Propia.

Por tanto,

$$\begin{aligned} X_i &= X \\ Y_i &= Y \cdot \cos i + Z \cdot \sin i \\ Z_i &= Z \cdot \cos i - Y \cdot \sin i \end{aligned}$$

En consecuencia, las fuerzas debidas al magnetismo inducido que actúan a lo largo de los ejes propios del buque son:

$$\begin{aligned} X' &= a \cdot X_i + b \cdot Y_i + c \cdot Z_i = a \cdot X + b \cdot Y \cdot \cos i + b \cdot Z \cdot \sin i + c \cdot Z \cdot \cos i - c \cdot Y \cdot \sin i \\ Y' &= d \cdot X_i + e \cdot Y_i + f \cdot Z_i = d \cdot X + e \cdot Y \cdot \cos i + e \cdot Z \cdot \sin i + f \cdot Z \cdot \cos i - f \cdot Y \cdot \sin i \\ Z' &= g \cdot X_i + h \cdot Y_i + k \cdot Z_i = g \cdot X + h \cdot Y \cdot \cos i + h \cdot Z \cdot \sin i + k \cdot Z \cdot \cos i - k \cdot Y \cdot \sin i \end{aligned}$$

Igual que sucede con las fuerzas de los imanes Q, R, las Y' , Z' se descomponen, según los ejes transversal y vertical a la rosa, en las fuerzas transversales $Y' \cdot \cos i$, $-Z' \cdot \sin i$, y en las verticales $Y' \cdot \sin i$, $Z' \cdot \cos i$; con lo cual, las fuerzas debidas al magnetismo inducido que actúan sobre los ejes referidos a la rosa son:

$$\begin{aligned} X'_i &= X' \\ Y'_i &= Y' \cdot \cos i - Z' \cdot \sin i \\ Z'_i &= Z' \cdot \cos i + Y' \cdot \sin i \end{aligned}$$

Así pues,

$$\begin{aligned} X'_i &= a \cdot X + b \cdot Y \cdot \cos i + b \cdot Z \cdot \sin i + c \cdot Z \cdot \cos i - c \cdot Y \cdot \sin i \\ Y'_i &= (d \cdot X + e \cdot Y \cdot \cos i + e \cdot Z \cdot \sin i + f \cdot Z \cdot \cos i - f \cdot Y \cdot \sin i) \cdot \cos i - \\ &\quad - (g \cdot X + h \cdot Y \cdot \cos i + h \cdot Z \cdot \sin i + k \cdot Z \cdot \cos i - k \cdot Y \cdot \sin i) \cdot \sin i \end{aligned}$$

$$Z'i = (g \cdot X + h \cdot Y \cdot \cos i + h \cdot Z \cdot \sin i + k \cdot Z \cdot \cos i - k \cdot Y \cdot \sin i) \cdot \cos i + \\ + (d \cdot X + e \cdot Y \cdot \cos i + e \cdot Z \cdot \sin i + f \cdot Z \cdot \cos i - f \cdot Y \cdot \sin i) \cdot \sin i$$

Desarrollando,

$$X'i = a \cdot X + (b \cdot \cos i - c \cdot \sin i) \cdot Y + (c \cdot \cos i + b \cdot \sin i) \cdot Z \\ Y'i = (d \cdot \cos i - g \cdot \sin i) \cdot X + [e \cdot \cos^2 i - (f + h) \cdot \sin i \cdot \cos i + k \cdot \sin^2 i] \cdot Y + \\ + [f \cdot \cos^2 i + (e - k) \cdot \sin i \cdot \cos i - h \cdot \sin^2 i] \cdot Z \\ Z'i = (g \cdot \cos i + d \cdot \sin i) \cdot X + [h \cdot \cos^2 i + (e - k) \cdot \sin i \cdot \cos i - f \cdot \sin^2 i] \cdot Y + \\ + [k \cdot \cos^2 i + (f + h) \cdot \sin i \cdot \cos i + e \cdot \sin^2 i] \cdot Z$$

Pero:

$$X'i = a_i \cdot X + b_i \cdot Y + c_i \cdot Z \\ Y'i = d_i \cdot X + e_i \cdot Y + f_i \cdot Z \\ Z'i = g_i \cdot X + h_i \cdot Y + k_i \cdot Z$$

donde a_i, \dots, k_i son las nuevas varillas. Por consiguiente,

$$a_i = a \\ b_i = b \cdot \cos i - c \cdot \sin i \\ c_i = c \cdot \cos i + b \cdot \sin i \\ d_i = d \cdot \cos i - g \cdot \sin i \\ g_i = g \cdot \cos i + d \cdot \sin i$$

Y sustituyendo $\cos^2 i$ por $1 - \sin^2 i$, se tiene:

$$e_i = e - (f + h) \cdot \sin i \cdot \cos i - (e - k) \cdot \sin^2 i \\ f_i = f + (e - k) \cdot \sin i \cdot \cos i - (f + h) \cdot \sin^2 i \\ h_i = h + (e - k) \cdot \sin i \cdot \cos i - (f + h) \cdot \sin^2 i \\ k_i = k + (f + h) \cdot \sin i \cdot \cos i + (e - k) \cdot \sin^2 i$$

Estas expresiones se simplifican mediante las dos siguientes aproximaciones:

- i) En los buques simétricos respecto del plano de crujía, que son casi todos, se puede considerar que: $b = d = f = h = 0$
- ii) En los balances normales ($i \leq 15^\circ$) se pueden hacer las siguientes sustituciones:

$$\sin i = i \cdot \sin 1^\circ \quad \cos i = 1 \quad \sin^2 i = 0$$

Entonces, queda:

$$\begin{array}{llll} P_i = P & a_i = a & d_i = -g \cdot i \cdot \sin 1^\circ & g_i = g \\ Q_i = Q - R \cdot i \cdot \sin 1^\circ & b_i = -c \cdot i \cdot \sin 1^\circ & e_i = e & h_i = (e - k) \cdot i \cdot \sin 1^\circ \\ R_i = R + Q \cdot i \cdot \sin 1^\circ & c_i = c & f_i = (e - k) \cdot i \cdot \sin 1^\circ & k_i = k \end{array}$$

(Moréu, 1987, pp. 139–144)

II.6.3. Coeficientes y ecuaciones

Los coeficientes exactos del desvío con el buque escorado (Δ_i) son:

$$\alpha_i = \frac{d_i - b_i}{2\lambda} = \frac{-g + c}{2\lambda} \cdot i \cdot \sin 1^\circ$$

$$\beta_i = \frac{P_i}{\lambda \cdot H} + \frac{c_i}{\lambda} \cdot \tan \theta = \frac{P}{\lambda \cdot H} + \frac{c}{\lambda} \cdot \tan \theta = \beta$$

$$\gamma_i = \frac{Q_i}{\lambda \cdot H} + \frac{f_i}{\lambda} \cdot \tan \theta = \frac{Q - R \cdot i \cdot \sin 1^\circ}{\lambda \cdot H} + \frac{e - k}{\lambda} \cdot i \cdot \sin 1^\circ \cdot \tan \theta$$

$$\delta_i = \frac{a_i - e_i}{2\lambda} = \frac{a - e}{2\lambda} = \delta$$

$$\varepsilon_i = \frac{d_i + b_i}{2\lambda} = \frac{-g - c}{2\lambda} \cdot i \cdot \sin 1^\circ$$

Teóricamente, tras la compensación con el buque adrizado, quedan los siguientes valores:

	$P = 0$	$a = e_2$	$d = 0$	$g = g$
$\lambda = \lambda_2$	$Q = 0$	$b = 0$	$e = e_2$	$h = 0$
	$R = R$	$c = 0$	$f = 0$	$k = k$

(Moréu, 1987, pp. 144–145)

Sin embargo, si como suele ser habitual, solo se lleva a cabo la compensación preliminar, resulta que:

$$\beta = 0 = \frac{P_2}{\lambda_2 \cdot H} + \frac{c}{\lambda_2} \cdot \tan \theta$$

Es decir: $P = P_2$, $c = c$. Por consiguiente, los coeficientes $\alpha_i, \dots, \varepsilon_i$ se convierten en:

$$\alpha_i = \frac{c - g}{2\lambda_2} \cdot i \cdot \sin 1^\circ \quad \beta_i = 0 \quad \gamma_i = \left(\frac{e_2 - k}{\lambda_2} \cdot \tan \theta - \frac{R}{\lambda_2 \cdot H} \right) \cdot i \cdot \sin 1^\circ \quad \delta_i = 0 \quad \varepsilon_i = -\frac{c + g}{2\lambda_2} \cdot i \cdot \sin 1^\circ$$

De ellos, se obtienen los coeficientes aproximados A_i, \dots, E_i , tales que:

$$\sin A_i = \alpha_i \quad B_i = 0 \quad \sin C_i = \gamma_i \quad D_i = 0 \quad \sin E_i = \varepsilon_i$$

Luego, la ecuación aproximada del desvío con el buque escorado es:

$$\Delta_i = A_i + C_i \cdot \cos R' + E_i \cdot \cos 2R'$$

Y considerando nulo el desvío con el barco adrizado, se obtiene la ecuación aproximada del desvío de escora (Δ_e):

$$\Delta_e = \Delta_i = A_i + C_i \cdot \cos R' + E_i \cdot \cos 2R'$$

Desarrollando,

$$\Delta_e = \alpha_i \cdot \csc 1^\circ + \gamma_i \cdot \csc 1^\circ \cdot \cos R' + \varepsilon_i \cdot \csc 1^\circ \cdot \cos 2R'$$

$$\Delta_e \cdot \sin 1^\circ = \alpha_i + \gamma_i \cdot \cos R' + \varepsilon_i \cdot \cos 2R'$$

$$\Delta_e \cdot \sin 1^\circ = \frac{c - g}{2\lambda_2} \cdot i \cdot \sin 1^\circ + \left(\frac{e_2 - k}{\lambda_2} \cdot \tan \theta - \frac{R}{\lambda_2 \cdot H} \right) \cdot i \cdot \sin 1^\circ \cdot \cos R' - \frac{c + g}{2\lambda_2} \cdot i \cdot \sin 1^\circ \cdot \cos 2R'$$

$$\Delta e = \frac{i}{\lambda_2} \cdot \left[\frac{1}{2}c \cdot (1 - \cos 2R') - \frac{1}{2}g \cdot (1 + \cos 2R') + \left[(e_2 - k) \cdot \tan \theta - \frac{R}{H} \right] \cdot \cos R' \right]$$

Pero solo se considera (Moréu, 1987, p. 146):

$$\Delta e = \frac{i}{\lambda_2} \cdot \left[(e_2 - k) \cdot \tan \theta - \frac{R}{H} \right] \cdot \cos R'$$

Pues se supone que la varilla c se ha anulado al efectuar la compensación con el buque adrizado. Asimismo, cuando la aguja está situada en el tercio central del buque, se puede obviar la varilla g (Moréu, 1987, p. 146). El problema es que: por un lado, la compensación definitiva no suele realizarse, y por el otro, hoy día, las bitácoras suelen estar instaladas en el tercio de popa, y cuando no es así, en el tercio de proa, como en los ferris o rolones. Sin embargo, de aquí en adelante, se seguirá el desarrollo clásico ($c = g = 0$), ya que, de hecho, el elemento que más incide en el desvío de escora es el imán R .

Asumida la simplificación de la expresión del desvío de escora, se define el coeficiente J como:

$$J = \frac{1}{\lambda_2} \cdot \left[(e_2 - k) \cdot \tan \theta - \frac{R}{H} \right]$$

De modo que:

$$\Delta e = J \cdot i \cdot \cos R'$$

De acuerdo con lo expuesto, el elemento con mayor incidencia en el coeficiente J es el imán R . Según el criterio de signos de los imanes, los que causan fuerzas verticales hacia abajo son positivos, mientras que los que las causan hacia arriba son negativos, o lo que es lo mismo: el imán R es positivo cuando tiene su polaridad roja arriba y la azul abajo, y negativo cuando la polaridad roja se encuentra abajo y la azul arriba.

Asimismo, este imán se origina durante la construcción del buque, de forma que: en el hemisferio N , la parte alta del buque tiene polaridad azul, y la baja, roja; mientras que en el hemisferio S es al revés (el rojo está arriba). Luego, R es negativo en los buques construidos en el hemisferio N , y positivo en aquellos construidos en el hemisferio S .

Ejercicio 39 (Moréu, 1987, p. 146): Al rumbo de aguja 030 , con el barco adrizado, se obtiene $\Delta = +2$, y escorado 5° a estribor, $\Delta = +2,5$. Calcular el valor de Δ_i , al SWa, para una escora de 10° a babor, siendo $\Delta = -4$ a este rumbo de aguja.

Solución:

$$\Delta e = \Delta_i - \Delta = J \cdot i \cdot \cos R'$$

$$\left. \begin{array}{l} 2,5 - 2 = J \cdot 5 \cdot \cos 30 \\ \Delta_i + 4 = J \cdot (-10) \cdot \cos 225 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{0,5}{\Delta_i + 4} = \frac{5 \cdot 0,866}{-10 \cdot (-0,707)} \Rightarrow \Delta_i = \frac{0,5 \cdot 10 \cdot 0,707}{5 \cdot 0,866} - 4 = \frac{0,707}{0,866} - 4 = -3,2$$

Igual que sucede con los coeficientes B y C, el coeficiente J tiene una parte debida al magnetismo inducido y otra al permanente, y por tanto, cambia con la latitud magnética:

$$J = \frac{1}{\lambda_2} \cdot \left[(e_2 - k) \cdot \frac{Z}{H} - \frac{R}{H} \right] = \frac{1}{\lambda_2 \cdot H} \cdot [(e_2 - k) \cdot Z - R]$$

Luego,

$$\lambda_2 \cdot H \cdot J = (e_2 - k) \cdot Z - R$$

Particularizando para dos puntos, se tiene:

$$\lambda_2 \cdot H_1 \cdot J_1 = (e_2 - k) \cdot Z_1 - R \quad (\text{i})$$

$$\lambda_2 \cdot H_2 \cdot J_2 = (e_2 - k) \cdot Z_2 - R \quad (\text{ii})$$

$$(\text{i}) - (\text{ii}) \Rightarrow \lambda_2 \cdot (H_1 \cdot J_1 - H_2 \cdot J_2) = (e_2 - k) \cdot (Z_1 - Z_2) \Rightarrow e_2 - k = \lambda_2 \cdot \frac{H_1 \cdot J_1 - H_2 \cdot J_2}{Z_1 - Z_2}$$

$$Z_2 \cdot (\text{i}) - Z_1 \cdot (\text{ii}) \Rightarrow \lambda_2 \cdot (Z_2 \cdot H_1 \cdot J_1 - Z_1 \cdot H_2 \cdot J_2) = -R \cdot (Z_2 - Z_1)$$

$$R = \lambda_2 \cdot \frac{Z_2 \cdot H_1 \cdot J_1 - Z_1 \cdot H_2 \cdot J_2}{Z_1 - Z_2}$$

Ejercicio 40 (propio): En Londres ($H = 1$; $Z = +2,4$) se obtuvo $\Delta e = -14$ al rumbo de aguja 140, con el barco escorado 8° a babor. Posteriormente, en Buenos Aires ($H = 1,2$; $Z = -0,7$) se obtiene $\Delta e = -8$ al rumbo de aguja 330, con el barco escorado 12° a estribor. $\lambda_2 = 0,8$. Calcular:

i) El valor del imán R.

ii) El valor de la varilla k.

iii) El coeficiente J en Malabo ($H = 1,7$; $Z = -0,5$).

iv) El desvío de escora en Malabo, al rumbo de aguja 050, con el barco escorado 15° a estribor.

Solución:

$$\text{i) } \Delta e = J \cdot i \cdot \cos R' \Rightarrow J = \frac{\Delta e}{i} \cdot \sec R'$$

$$J_1 = \frac{-14}{-8} \cdot \sec 140 = \frac{7}{4} \cdot (-1,305) = -2,284 \quad J_2 = \frac{-8}{12} \cdot \sec 330 = -\frac{2}{3} \cdot 1,155 = -0,77$$

$$R = \lambda_2 \cdot \frac{Z_2 \cdot H_1 \cdot J_1 - Z_1 \cdot H_2 \cdot J_2}{Z_1 - Z_2} = 0,8 \cdot \frac{-0,7 \cdot 1 \cdot (-2,284) - 2,4 \cdot 1,2 \cdot (-0,77)}{2,4 + 0,7}$$

$$R = 0,8 \cdot \frac{1,5988 + 2,2176}{3,1} = +0,985$$

ii)

$$e_2 - k = \lambda_2 \cdot \frac{H_1 \cdot J_1 - H_2 \cdot J_2}{Z_1 - Z_2} = 0,8 \cdot \frac{1 \cdot (-2,284) - 1,2 \cdot (-0,77)}{3,1} = 0,8 \cdot \frac{-2,284 + 0,924}{3,1} = -0,351$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \Rightarrow e_2 = \lambda_2 - 1 = 0,8 - 1 = -0,2$$

$$e_2 - k = -0,351 \Rightarrow k = e_2 + 0,351 = -0,2 + 0,351 = +0,151$$

$$\text{iii) } J = \frac{1}{\lambda_2 \cdot H} \cdot [(e_2 - k) \cdot Z - R] = \frac{1}{0,8 \cdot 1,7} \cdot [-0,351 \cdot (-0,5) - 0,985] = \frac{0,1755 - 0,985}{1,36} = -0,595$$

$$\text{iv) } \Delta e = J \cdot i \cdot \cos R' = -0,595 \cdot 15 \cdot \cos 50 = -8,925 \cdot 0,643 = -5,7$$

II.6.4. Compensación del desvío de escora

Aunque el desvío de escora depende tanto de los hierros duros como de los dulces, su compensación se efectúa únicamente con imanes, debiéndose rectificar siempre que la latitud magnética lo requiera.

Los correctores más comunes son: o bien un imán más corto, aunque mucho más recio, que los empleados para compensar el desvío semicircular, o bien un estuche de material antimagnético con siete alojamientos verticales para introducir imanes del mismo tipo que los usados para compensar el desvío semicircular. En la Figura 41, se muestra la disposición de los imanes en los siete alojamientos, según cuál sea el número de ellos (Moréu, 1987, p. 168).

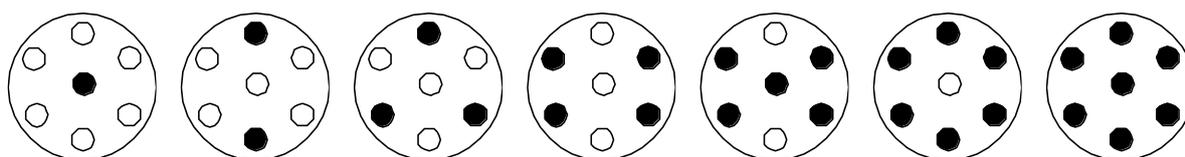


Figura 41. Disposición de los imanes verticales dentro del estuche. Fuente: Propia.

El desvío de escora se puede compensar aprovechando los balances:

Si el corrector de escora consta de un solo imán, cuando la aguja oscila por causa del balance, se coloca en su posición más baja, y se va subiendo. Si la amplitud de las oscilaciones disminuye a medida que se sube, esto indica que la polaridad del imán es la adecuada, y se sigue subiéndolo, hasta que desaparezcan las oscilaciones. Por el contrario, si al subir el corrector, la amplitud de las oscilaciones aumenta, hay que volver a empezar el proceso, pero con la polaridad invertida. (Moréu, 1987, p. 181)

Si el corrector permite alojar varios imanes, se puede anular el desvío de escora ajustando tanto su posición como el número de imanes. Una posibilidad es la siguiente: se deja en su punto más bajo, y se van introduciendo imanes. Si las oscilaciones aumentan, se invierte la polaridad de los imanes, y si disminuyen, se siguen colocando imanes hasta que desaparezcan las oscilaciones o se inviertan (si por ejemplo, al escorar a estribor, el N de la aguja también iba a estribor, ahora lo hace a babor). Si se consigue eliminar las oscilaciones, la compensación ya se ha completado; mientras que si se invierten, se quita el último imán, y se sube el corrector hasta que cese el vaivén de la aguja.

En cualquier caso, para tener la certeza de que la amplitud de las oscilaciones aumenta o disminuye debido al efecto del corrector de escora, es preciso que los balances sean regulares (Moréu, 1987, p. 181).

Otra forma de compensar el desvío de escora, consiste en provocar una escora en aguas tranquilas, normalmente en puerto. Dicha escora debe ser considerable, por lo menos de 10°, y el desvío se anula actuando sobre el corrector, hasta conseguir el mismo rumbo de aguja que con el buque adrizado. (Moréu, 1987, p. 181)

Asimismo, la condición óptima para la compensación del desvío de escora se da a los rumbos de aguja N y S, donde su valor es máximo, ya que: $\Delta e = J \cdot i \cdot \cos R' = \pm J \cdot i$. Por el contrario, a los rumbos de aguja E y W, la compensación es impracticable, puesto que $\Delta e = 0$.

La forma como se lleva a cabo la compensación del desvío de escora, supone considerar que el coeficiente J depende únicamente del imán R; esto es:

$$J = -\frac{R}{\lambda_2 \cdot H} \Rightarrow R = -J \cdot \lambda_2 \cdot H$$

Por tanto, el corrector de escora (imán vertical o conjunto de ellos: Iv) debe contrarrestar el efecto del imán R:

$$Iv = -R = J \cdot \lambda_2 \cdot H$$

Luego, el signo del Iv es el mismo que el de J, ya que λ_2 y H siempre son positivos. Además, hay que tener en cuenta que el Iv está instalado debajo de la aguja, de modo que solo tiene un polo activo, que es el superior. En consecuencia, un Iv positivo tiene la parte superior con polaridad S o azul (la cual atrae el N de la aguja hacia abajo), mientras que un Iv negativo tiene la parte superior con polaridad N o roja (la cual repele el N de la aguja hacia arriba), o dicho de otra forma: un Iv positivo tiene la polaridad roja abajo, y uno negativo, arriba. Por consiguiente, si J es positivo, el Iv se debe colocar con el rojo abajo; mientras que si J es negativo, debe ir con el rojo arriba.

Así pues, la polaridad del Iv es análoga a la de los imanes logitudinales y transversales, sacándose la siguiente regla: si el coeficiente (B, C o J) que debe anular un imán, es positivo, dicho imán se debe colocar con su polaridad roja hacia donde las fuerzas P, Q, R son positivas; es decir: a proa, estribor o abajo; y viceversa si el coeficiente es negativo.

Obsérvese también que el signo de J depende de los signos de: Δe , i, $\sec R'$. Pues:

$$\Delta e = J \cdot i \cdot \cos R' \Rightarrow J = \frac{\Delta e}{i} \cdot \sec R'$$

Ejercicio 41 (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 104): Determinar la polaridad del Iv si, tras anular el desvío al N con el barco adrizado, se escora 10° a estribor, y se obtiene $\Delta n = -6$.

Solución:

$\Delta e = -6 - 0 = -6$: negativo (-); $i = +10$: positivo (+); $\sec R' = \sec 0 = 1$: positivo (+)

Luego, J es negativo (- / + · +), y por tanto, el Iv debe colocarse con el rojo hacia arriba.

Ejercicio 42 (propio): En una bitácora, el Iv se encuentra a la mitad de su recorrido, con el rojo arriba. Estando el barco adrizado, se obtiene $\Delta s = -1$, y escorándolo 10° a babor, $\Delta s = +2$.

Razonar si hay que subir o bajar el Iv para compensar el desvío de escora.

Solución:

$\Delta e = +2 + 1 = +3$ (+); i : babor (-); $\sec R' = \sec 180 = -1$ (-) $\rightarrow J (+) = (+ / - \cdot -) \rightarrow$ rojo abajo

Sin embargo, el Iv tiene el rojo arriba, de modo que contrarresta en exceso el efecto del imán R. Por consiguiente, hay que alejarlo de la aguja, o sea: bajarlo.

Ejercicio 43 (propio): Un buque con compás giroscópico navega al Sg dando fuertes balances, los cuales provocan una oscilación considerable de la aguja magnética, circunstancia que se aprovecha para compensar el desvío de escora, observando que: cuando el buque escora a estribor, el S de la aguja se va a babor, y cuando escora a babor, el S de la aguja se va a estribor. El Iv está a la mitad de su recorrido, con el rojo arriba. Razonar si hay que subirlo o bajarlo.

Solución:

Cuando el buque escora a estribor, el S de la aguja se va a babor, y en su lugar (en la línea de fe) queda un $R' > 180$, de modo que: con el barco adrizado, $R' \approx 180$, y escorado, $R' > 180$. Por consiguiente, Δe es positivo. Asimismo, el valor de i es positivo (estribor), mientras que $\sec R' \approx \sec 180 = -1$ es negativo. Luego, J es negativo (+ / + · -).

Cuando el buque escora a babor, el S de la aguja se va a estribor, quedando en su lugar un $R' < 180$. En este caso, Δe es negativo. A su vez, los valores de i y $\sec R'$ también son negativos, y en consecuencia, J es negativo (- / - · -).

Tanto si se hace el análisis con el buque escorado a estribor, como a babor, el signo de J es el mismo, puesto que este coeficiente no depende de i . En cualquier caso, por ser J negativo, el Iv debe ir con el rojo arriba, que es como ya está instalado. Sin embargo, no llega a contrarrestar todo el efecto del imán R, y por tanto, hay que acercarlo más a la aguja, o sea: subirlo.

II.6.5. Fuerza vertical media, coeficiente μ , factor del barco y balanza de inclinación

Las fuerzas verticales que actúan sobre la aguja, provienen de los siguientes campos magnéticos: el terrestre (Z), el permanente (R) y el inducido (Z'). Luego, la resultante de las fuerzas verticales es:

$$F_v = Z + R + Z'$$

Desarrollando,

$$F_v = Z + R + g \cdot X + h \cdot Y + k \cdot Z$$

Pero $X = H \cdot \cos R$, $Y = -H \cdot \sin R$, donde R es el rumbo magnético. Por consiguiente,

$$F_v = Z + R + g \cdot H \cdot \cos R - h \cdot H \cdot \sin R + k \cdot Z$$

$$F_v = R + (1 + k) \cdot Z + (g \cdot \cos R - h \cdot \sin R) \cdot H$$

En estas expresiones, es importante no confundir el imán R con el rumbo magnético.

La parte $R + (1 + k) \cdot Z$ es constante (en el sentido de que no depende del rumbo), mientras que la parte $(g \cdot \cos R - h \cdot \sin R) \cdot H$ es variable. No obstante, para k rumbos equidistantes, la media de la parte variable es 0. Ejemplo para los rumbos magnéticos 0, 120 y 240:

$$F_{\text{var}}(000) = (g \cdot \cos 0 - h \cdot \sin 0) \cdot H = g \cdot H$$

$$F_{\text{var}}(120) = (g \cdot \cos 120 - h \cdot \sin 120) \cdot H = (-g \cdot \cos 60 - h \cdot \sin 60) \cdot H$$

$$F_{\text{var}}(240) = (g \cdot \cos 240 - h \cdot \sin 240) \cdot H = (-g \cdot \cos 60 + h \cdot \sin 60) \cdot H$$

$$\Sigma F_{\text{var}} = g \cdot (1 - 2 \cdot \cos 60) \cdot H = g \cdot (1 - 2 \cdot \frac{1}{2}) \cdot H = 0 \Rightarrow F_{\text{var m}} = 0$$

En consecuencia, la fuerza vertical media es la parte constante:

$$F_{\text{vm}} = R + (1 + k) \cdot Z$$

Asimismo, de forma análoga a la fuerza directriz media, se define el coeficiente de la fuerza vertical media (μ):

$$\mu = \frac{F_{\text{vm}}}{Z} = 1 + k + \frac{R}{Z}$$

Cuando se ha efectuado la compensación del desvío cuadrantal ($a = e = e_2$), así como la del desvío de escora (suponiendo $c = g = 0$), resulta que:

$$J = \frac{1}{\lambda_2 \cdot H} \cdot [(e_2 - k) \cdot Z - R] = 0 \Rightarrow (e_2 - k) \cdot Z - R = 0 \Rightarrow e_2 - k = \frac{R}{Z}$$

Luego, el coeficiente μ_2 que se obtiene tras la compensación del desvío de escora, es:

$$\mu_2 = 1 + k + \frac{R}{Z} = 1 + k + e_2 - k = 1 + e_2 = \lambda_2$$

O sea: el coeficiente de las fuerzas horizontal y vertical medias es el mismo, el cual se denomina factor del barco.

(Moréu, 1987, pp. 148–149)

Estando el buque adrizado, el coeficiente μ (o μ_2) se determina mediante una balanza de inclinación. Este instrumento consiste en una aguja magnética que se puede inclinar alrededor de un eje horizontal, el cual está fijo en una caja de latón (o de otro material antimagnético), generalmente cilíndrica, y con una o ambas tapas de cristal, quedando la aguja paralela a ellas. Así como para obtener λ mediante los periodos, se sustituye el mortero por una aguja oscilante, para determinar μ , se sustituye por la balanza, de forma que la aguja de la balanza quede a la

altura de la rosa, a fin de que las fuerzas que actúen sobre ella, sean las mismas que lo hacen sobre la aguja del compás.

Cada modelo dispone de un sistema para dejar la aguja de la balanza en la posición requerida. Por ejemplo: una simple cadena de donde cuelga la caja, la cual se sostiene con la mano o se hace firme en un dispositivo, o bien dos brazos horizontales que unen la caja con el borde superior de la bitácora, los cuales han de poder ajustar su longitud al diámetro de la bitácora. Si se utiliza el sistema de cadena, en la caja hay un nivel de burbuja para comprobar su horizontalidad.

En cualquier caso, siendo m la masa magnética de los polos de la aguja de la balanza, en el N, actúa la fuerza $m \cdot F_v$, y en el S, la $-m \cdot F_v$, de modo que la aguja se inclina. Pero a lo largo de su longitud, se puede mover un contrapeso, con el fin de enderezarla. Dicho contrapeso puede moverse manualmente o con un tornillo micrométrico, y en el hemisferio N, se debe colocar en el brazo S de la aguja; mientras que en el hemisferio S, tiene que ir en el brazo N. El motivo de esto es que: en el hemisferio N, el brazo S de la aguja queda levantado, y el N, hundido, con lo cual, el contrapeso se debe colocar en el brazo levantado (el S) para que su peso lo haga descender y equilibre la aguja, y viceveras en el hemisferio S. Asimismo, para determinar con precisión el momento en que la aguja queda horizontal, en las tapas de la caja, hay una línea de referencia.

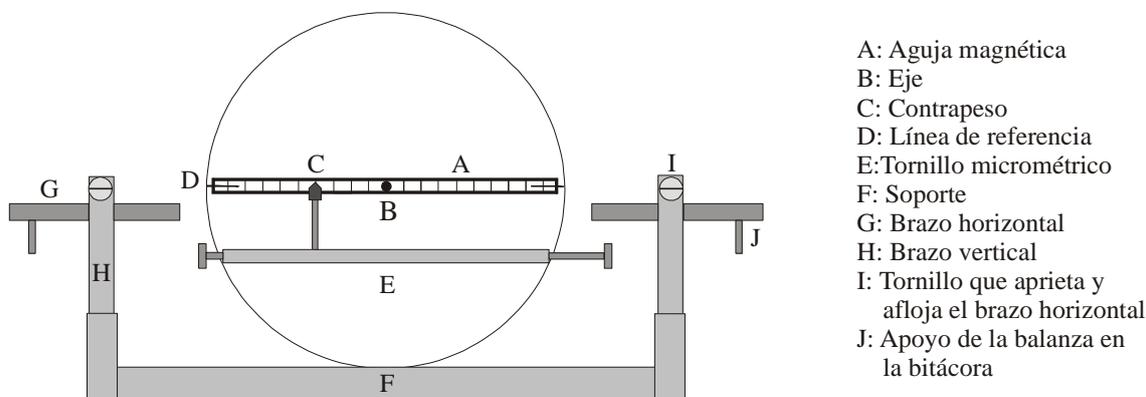


Figura 42. Balanza de inclinación. Fuente: Propia.

Siendo d la distancia entre ambos polos, p el peso del contrapeso, y r su distancia al centro, se cumple la siguiente igualdad de momentos:

$$p \cdot r = m \cdot F_v \cdot d = M \cdot F_v$$

La distancia r se suele expresar mediante el número indicado en la graduación (división). Así pues, siendo u la distancia entre divisiones, en la división n , la distancia al eje es $r = n \cdot u$. Luego,

$$p \cdot n \cdot u = M \cdot F_v$$

Pero:

$$F_v = R + (1 + k) \cdot Z + (g \cdot \cos R - h \cdot \sin R) \cdot H$$

Además, en los buques simétricos respecto del plano de crujía (casi todos) $h = 0$. Por tanto,

$$F_v = R + (1 + k) \cdot Z + g \cdot H \cdot \cos R$$

Y a los rumbos magnéticos E y W,

$$F_v = R + (1 + k) \cdot Z = F_{vm} = \mu \cdot Z$$

Con lo cual,

$$p \cdot n \cdot u = M \cdot \mu \cdot Z \quad (i)$$

Aparte de que a los rumbos magnéticos E y W, no se manifiesta el efecto de la varilla g , cuando el barco sigue dichos R, la aguja de la balanza queda sobre el meridiano magnético, ya que el aparato se instala de forma que las tapas de cristal queden en las partes de proa y de popa de la bitácora (o a popa si solo tiene una), a fin de ver la aguja desde la posición habitual a popa de la bitácora. Asimismo, es preferible colocar la balanza de forma que el N de su aguja se dirija hacia el Nm, y el S hacia el Sm, tal como quedaría si pudiera girar en el plano horizontal, aunque solo se puede escoger la dirección de la aguja si las dos tapas son transparentes.

Repitiendo el proceso en tierra, en un lugar libre de perturbaciones magnéticas (donde la única fuerza vertical es Z), la aguja se equilibra con el contrapeso está en la división N, de modo que:

$$p \cdot N \cdot u = M \cdot Z \quad (ii)$$

Hay modelos de balanzas en los que se indica su constante, que es el número por el que hay que dividir la fuerza vertical Z del lugar para obtener la división N en la que el contrapeso equilibra la aguja. Si se dispone de la constante, no es necesario llevar la balanza a tierra; pero es preferible determinar N en tierra, y tomar el valor de N obtenido a partir de la constante solo como una indicación.

En cualquier caso, dividiendo (i) entre (ii), se tiene:

$$\mu = \frac{n}{N}$$

Mediante la balanza de inclinación, también se puede compensar el desvío de escora. Basta con instalar la balanza con el contrapeso en la división N, y proa al E/Wm, estando el barco adrizado, mover el Iv hasta encontrar la posición en que la aguja quede horizontal.

(Moréu, 1987, pp. 159–161, 201)

Obsérvese que: asumiendo que $c = g = h = 0$, la compensación del desvío de escora se puede efectuar con el buque atracado a cualquier rumbo, aunque teniendo en cuenta que se debe orientar la aguja de la balanza en la dirección del meridiano magnético.

II.7. Efectos secundarios de los correctores

Como ya se apuntó en el epígrafe II.4.7, cada esfera corresponde a una varilla $-k$. Este efecto se denomina influjo de las esferas, y se anula con el corrector de escora. Por tanto, se deben colocar las esferas antes que el corrector de escora.

La barra Flinders también da lugar a otra varilla de tipo k , debido al efecto de su polo inferior.

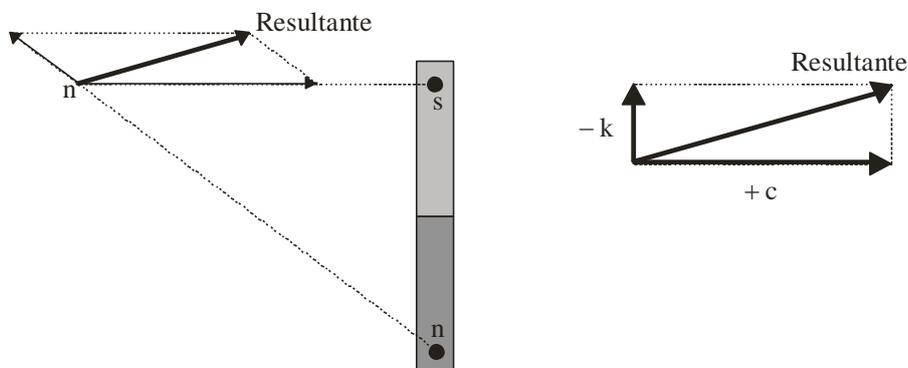


Figura 43. Efecto de los dos polos de la barra Flinders sobre la aguja en el hemisferio N. Fuente: Propia.

En el hemisferio N, el polo inferior de la barra Flinders es un N que repele el N de la aguja hacia arriba; mientras que en el hemisferio S, el polo inferior es un S que atrae el N de la aguja hacia abajo. En ambos hemisferios, este efecto es el mismo que produciría una varilla $-k$. En consecuencia, se debe colocar la barra Flinders antes que el corrector de escora.

Asimismo, dado que la barra tiene un diámetro apreciable, el componente H la induce horizontalmente, tal como lo hace con las esferas. El resultado es un pequeño efecto cuadrantal, formado por una varilla $+a$ y otra $-e$, las cuales se deben anular con las esferas.

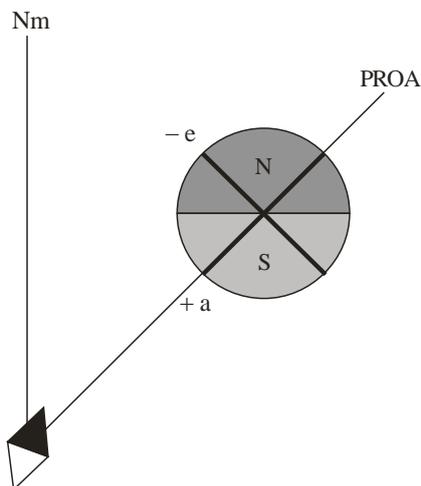


Figura 44. Inducción de la barra Flinders por el componente H. Fuente: Propia.

Por consiguiente, hay que instalar la barra Flinders antes que las esferas. No obstante, para compensar el magnetismo vertical inducido, bien sea al rumbo de grada o a su opuesto, o en otra latitud magnética, se precisa que se haya anulado el desvío cuadrantal, y por tanto, que las esferas estén colocadas. La solución que se adopta consiste en colocar la mitad de la barra

Flinders sin las esferas, con el fin de que se manifiesten las varillas $+a$, $-e$ citadas, y una vez compensado el desvío cuadrantal con las esferas, si es necesario, ajustar la longitud de la barra. Por último, el corrector de escora induce verticalmente la barra Flinders, debido a la poca distancia horizontal que hay entre ambos correctores. En la Figura 45, se muestra la inducción de la barra por parte del corrector de escora, según cuál sea su posición vertical. El efecto del componente Z, que es el deseado (una varilla c), no está representado en la Figura 45. En ella, se observa como el corrector de escora origina a un imán R y a otro P.

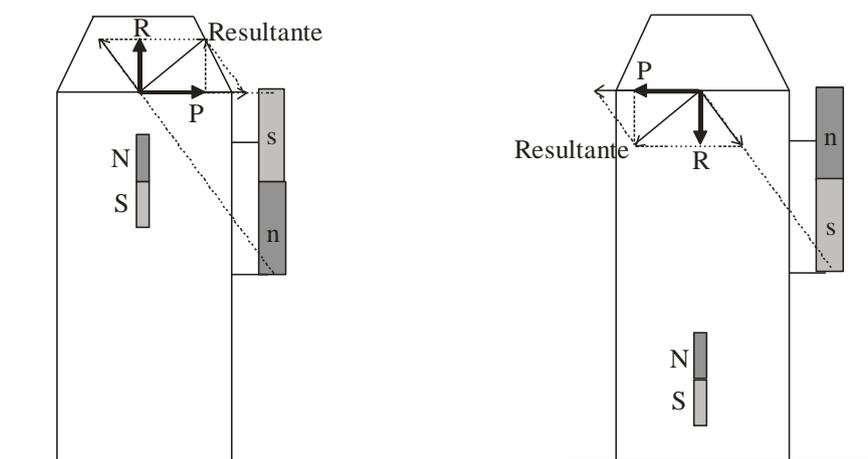


Figura 45. Inducción de la barra Flinders por el corrector de escora. Fuente: Propia.

El imán R se contrarresta automáticamente con el propio corrector de escora, pero el imán P se debe anular con imanes longitudinales. Además, si la barra estuviera girada, la inducción del corrector de escora originaría un imán Q adicional, que se debería anular con imanes transversales. En consecuencia, la barra y el corrector de escora se tienen que colocar antes que los imanes horizontales.

No se considera la inducción de los correctores de hierro duro sobre las esferas, puesto que, como se indicó en el epígrafe II.4.2, dichos correctores se encuentran alejados de ellas.

En resumen, para efectuar una compensación rigurosa, primero se deben colocar los correctores de hierro dulce, y luego, los de hierro duro; en el orden que se indica:

- i) Barra Flinders. Se coloca la mitad de la barra.
- ii) Esferas: corrigen el efecto cuadrantal de la barra. Inicialmente, se colocan a la mitad de su recorrido, y una vez compensado el desvío semicircular, se reajusta su posición.
- iii) Corrector de escora: corrige las varillas $-k$ de la barra y de las esferas.
- iv) Imanes horizontales: corrigen los imanes P y Q debidos a la inducción de la barra por el corrector de escora.

El orden de los imanes longitudinales es indiferente; pero se aconseja colocar primero los que vayan a compensar un desvío mayor, que suelen ser los longitudinales al E/Wm.

(Gaztelu-Iturri, 1999, pp. 79, 83–85; Moréu, 1987, pp. 174–178, 180)

II.8. Limitaciones de la aguja náutica

II.8.1. Limitación de la compensación

En el momento de la compensación, el buque puede estar afectado por un magnetismo subpermanente, de modo que se compense incorrectamente su magnetismo permanente. Esto puede suceder si se compensa en las siguientes circunstancias: a la salida de una estancia en dique; después de una carga o descarga de muchos días (con el barco atracado a un mismo muelle), o cuando el buque llega a puerto después de haber estado varios días siguiendo un mismo rumbo. Esta limitación no debe confundirse con los supuestos en los que se debe compensar la aguja, los cuales están contemplados en la normativa.

II.8.2. Limitación en las zonas polares

Cuando el componente horizontal de la densidad del flujo magnético es inferior a $6 \mu\text{T}$, la aguja empieza a tener un comportamiento errático, y cuando dicho componente es inferior a $3 \mu\text{T}$, queda inoperativa¹⁴. La Figura 46 muestra parte de las áreas con valores críticos de $H < 3 \mu\text{T}$ (rojo) y $H < 6 \mu\text{T}$ (amarillo). Ambas regiones se denominan área de no fiabilidad de la aguja.

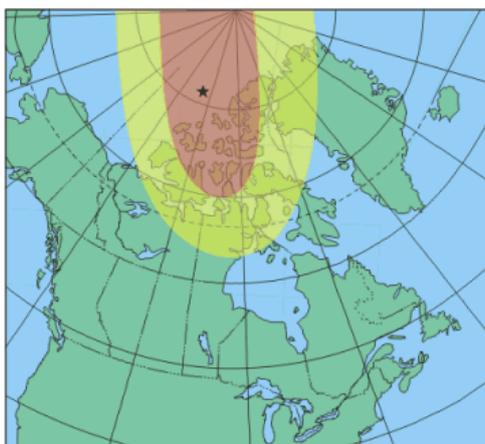


Figura 46. Valores críticos de H en el hemisferio N. Fuente: https://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/compass-en.php.

Debido a la existencia de esta área de no fiabilidad, el Código Polar, en su apartado 9.3.2.2, obliga a disponer de dos sistemas no magnéticos para indicar el rumbo, y de forma más específica, a partir de los 80° de latitud, prescribe un compás satelital.

A continuación, se muestran las cartas isodinámicas horizontales de las regiones ártica y antártica para el año 2020. Los valores de H vienen dados en nanoteslas (nT), y las estrellas indican los polos magnéticos. El informe *The US/UK World Magnetic Model for 2020–2025* (WMM2020) incluye la novedad de representar dos regiones del área de no fiabilidad en las cartas magnéticas, las cuales denomina *Caution Zone* ($H < 6 \mu\text{T}$) y *Blackout Zone* ($H < 2 \mu\text{T}$).

¹⁴ https://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/compass-en.php

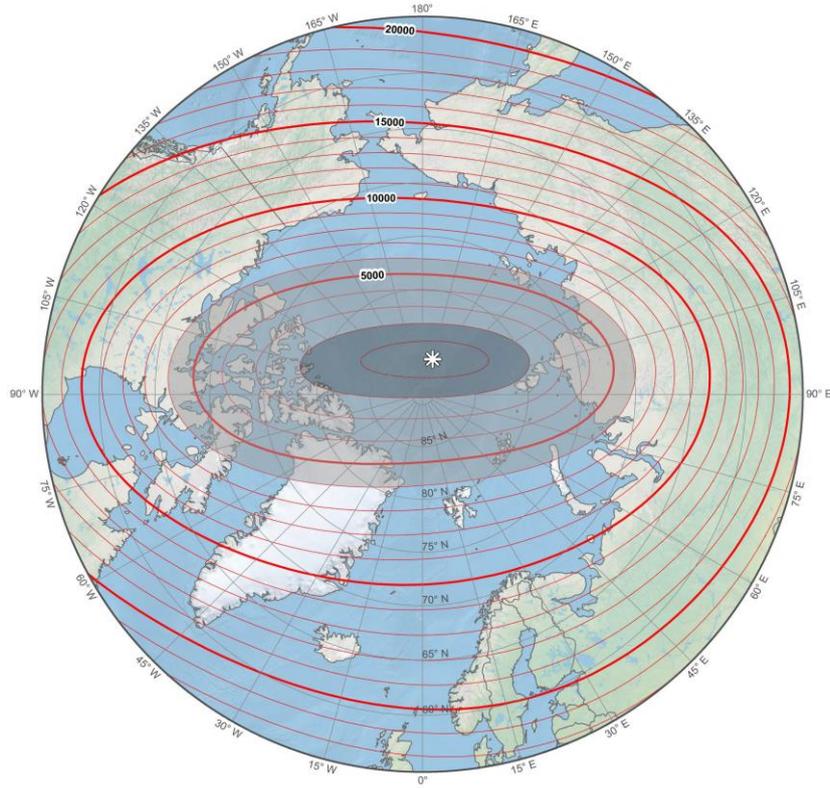


Figura 47. Carta isodinámica horizontal de la región ártica. Fuente: WMM2020. p. 77.

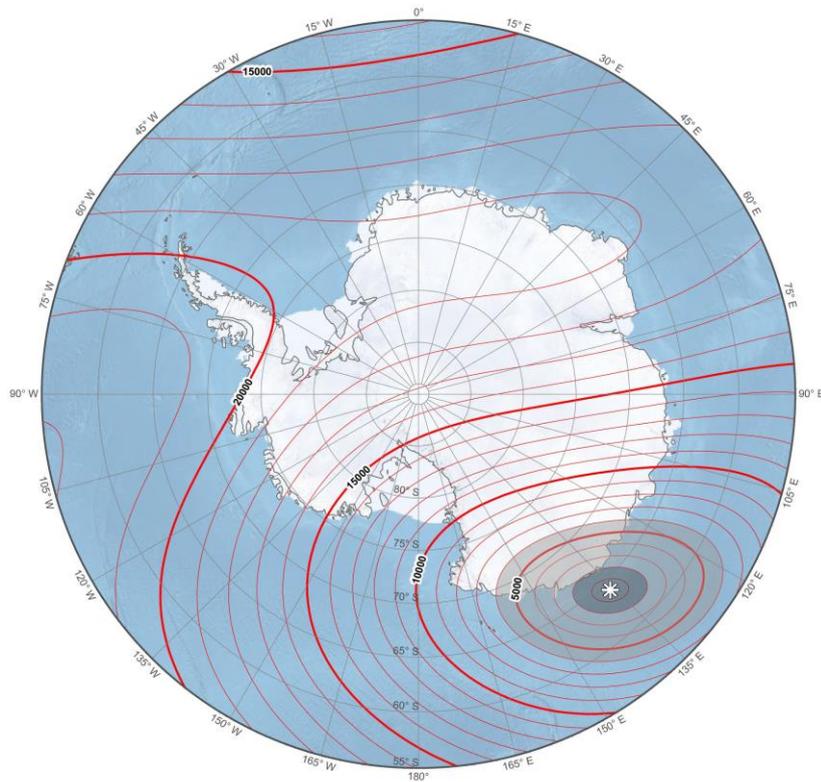


Figura 48. Carta isodinámica horizontal de la región antártica. Fuente: WMM2020. p. 84.

El motivo por el cual la aguja no funciona bien cuando H es muy débil, es triple: pierde sensibilidad; aumentan los desvíos residuales, y las oscilaciones diurnas mencionadas en el capítulo I.3 pueden ser significativas.

En el epígrafe I.1.6, se vio que la sensibilidad viene dada por el ángulo β , cuya expresión es:

$$\sin \beta = \frac{R}{M \cdot H}$$

Luego, cuanto menor sea H, mayor será β , y en consecuencia, la aguja será menos sensible.

Actualmente, se fabrican compases con muy poco rozamiento, los cuales tienen un buen rendimiento hasta la isodinámica horizontal de $3 \mu\text{T}$, y también existen compases electrónicos basados en sensores de campo magnético. Estos últimos, al no tener piezas mecánicas, no sufren rozamiento, y por tanto, pueden utilizarse aun cuando $H < 3 \mu\text{T}$, de modo que solamente quedan inoperativos en los polos magnéticos y en sus inmediaciones.¹⁵ No obstante, estos compases no cumplen con lo dispuesto en el párrafo 2.1.1 de la regla V/19 del Convenio SOLAS, ya que necesitan suministro eléctrico para su funcionamiento.

Respecto de los desvíos residuales, en el epígrafe II.5.1, se vio que los desvíos cuadrantal y constante no cambian con la latitud magnética, pero sí el semicircular. Por consiguiente, aunque las varillas a_2 , e_2 no sean exactamente iguales, y den lugar a un coeficiente D residual, este permanece constante en todo lugar. Y lo mismo ocurre si existen varillas d, b: los coeficientes A, E no varían. Como ejemplo, la Figura 37 sigue siendo válida para los valores residuales. Sin embargo, los elementos residuales del desvío semicircular (P_2 , Q_2 , c_2 , f) crean desvíos que aumentan con la latitud magnética, siendo aquí válidas las Figuras 35 y 36. Luego, cuando H es muy débil, aunque estos elementos residuales tengan poco valor, la fuerza perturbadora que ejercen sobre la aguja puede ser muy intensa en relación con la fuerza H. Además, en el caso de las varillas verticales, la fuerza desviadora depende del componente Z, que aumenta mucho en las zonas polares. Por tanto, el efecto perturbador de las varillas verticales es aún más fuerte que el de los imanes, ya que: no solo disminuye la fuerza directriz (H), sino que también aumentan las fuerzas perturbadoras ($c_2 \cdot Z$, $f \cdot Z$). El elemento que más hace notar su influencia, suele ser la varilla c_2 , y como consecuencia de su efecto, se dice que la barra Flinders *trinca* la aguja.

¹⁵ https://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/compass-en.php

Asimismo, las variaciones diurnas de la dm , que por lo general no son significativas, es normal que superen los 5° en las áreas donde $H < 3 \mu T$. Luego, en estas zonas, los compases electrónicos tampoco son fiables, ya que están sujetos a dichas variaciones.¹⁶

También se debe tener en cuenta que en las zonas polares, la dm cambia mucho en poca distancia, como se muestra en las cartas isógonas de estas regiones (Figuras 49 y 50). Por tanto, hay que enmendar frecuentemente el rumbo de aguja.

Hoy día, aparte de las cartas isógonas, hay programas en los que: introduciendo la situación del buque, calculan la dm . Entre estos, destaca el de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, de EE.UU.), así como el de la página del Gobierno canadiense: *Natural Resources Canada*. Ambos indican cuando el compás se comporta de forma errática. Al ser $H < 6 \mu T$, el programa canadiense advierte mediante el siguiente aviso: *Warning! Compass erratic for this coordinate*. Asimismo, el programa de la NOAA¹⁷ da los siguientes avisos: cuando $H < 6 \mu T$, *Caution: location is approaching the blackout zone around the magnetic pole [...] Compass accuracy may be degraded in this region.*, y cuando $H < 2 \mu T$, *Warning: location is in the blackout zone around the magnetic pole [...] Compass accuracy is highly degraded in this region.*

Las cartas electrónicas también tienen un calculador de dm , de modo que: si se utiliza el compás magnético, se obtiene directamente el rumbo verdadero, aunque con el error de no tener en cuenta los desvíos. Por tanto, es importante que se haya efectuado la compensación definitiva, a fin de evitar el aumento de los desvíos residuales.

Además, tal como se indica en el anexo A.3, los dispositivos transmisores de rumbo deben proporcionar una señal de rumbo verdadero, de manera que: si se utiliza el compás magnético, el piloto automático tiene que operarse con rumbos verdaderos. Para ello, debe haber un dispositivo que permita introducir manualmente la dm y los coeficientes del desvío.¹⁸

A continuación, se muestran las cartas isógonas de las regiones ártica y antártica para el año 2020. En ellas, se puede apreciar la rápida variación de la dm cerca de los polos geográfico y magnético, así como en la zona entre ellos.

¹⁶ https://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/compass-en.php

¹⁷ <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml>

¹⁸ Apartados 4.1.1 y 4.2 de la Resolución MSC.116(73) de la OMI.

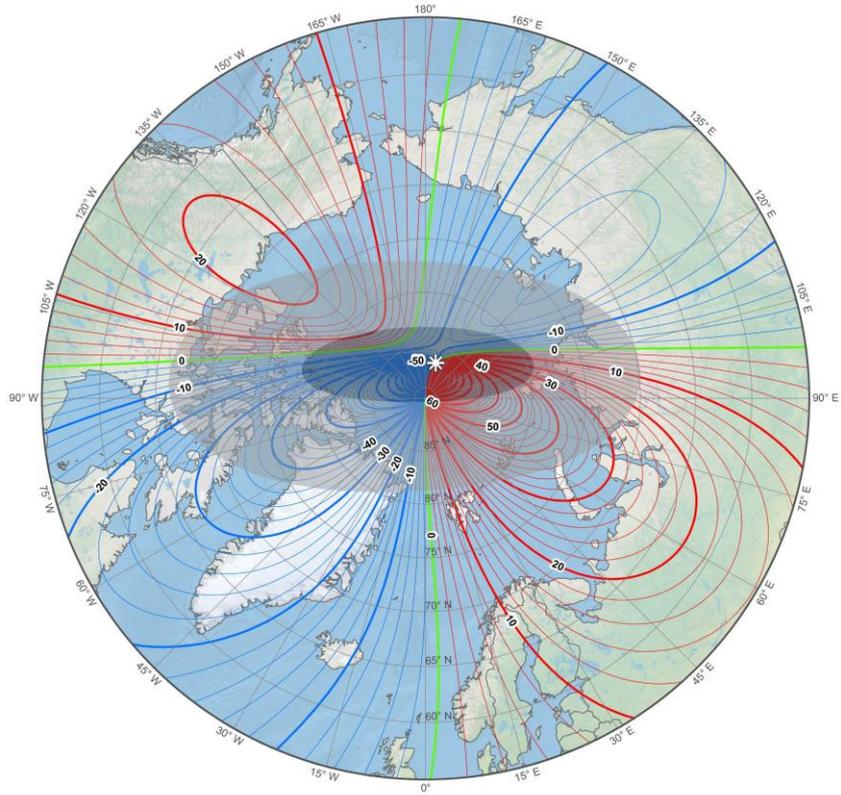


Figura 49. Carta isógona de la región ártica. Fuente: WMM2020. p. 80.

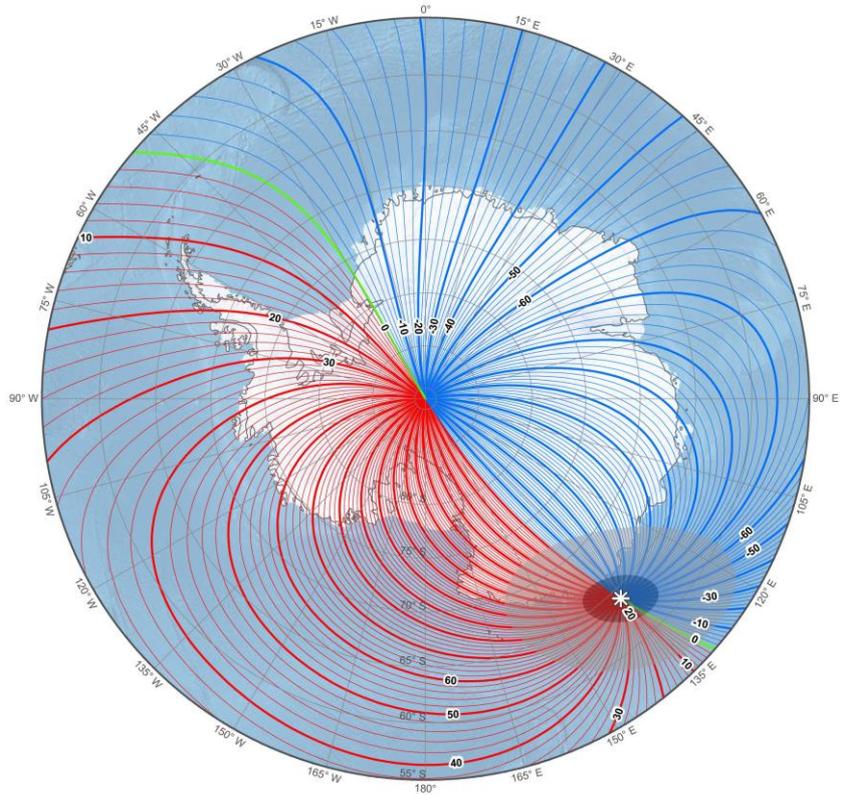


Figura 50. Carta isógona de la región antártica. Fuente: WMM2020. p. 87.

PARTE III: ESTADO DE LA TÉCNICA

III.1. Estado de la técnica

III.1.1. Introducción

La técnica de compensar agujas náuticas tiene su fundamento en los dos siguientes puntos:

- i) El estudio del comportamiento magnético de los hierros del buque, el cual permite hallar la ecuación exacta del desvío de la aguja a un determinado rumbo magnético.
- ii) El desarrollo de la ecuación del desvío en series de Fourier, mediante el cual se obtienen ecuaciones aproximadas, pero lineales, del desvío a un determinado rumbo de aguja.

La técnica de la compensación se desarrolló con los trabajos realizados por Archibald Smith y otros investigadores a lo largo del siglo XIX, como M. Flinders, G. B. Airy, F. J. Evans, S. D. Poisson o W. Thompson (Lord Kelvin) (Arribalzaga, 2016, epígrafe 2.1). Pero desde finales del siglo XIX hasta finales del siglo XX, la actividad no sufrió ningún desarrollo sustancial. La única excepción se encuentra en el ámbito operacional a partir de la aparición de los compases giroscópicos, los cuales permiten aproar a los rumbos magnéticos deseados, de modo que se puede llevar a cabo una compensación sin necesidad de seguir enfilaciones, o de tomar demoras a puntos conspicuos de tierra (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 80) o azimutes del sol (NGA, 2004, pp. 35–38) a diferentes rumbos de aguja. No obstante, este estancamiento se ha roto en los últimos años, con la aparición de estudios enfocados a la mejora del rendimiento de los compases magnéticos. En el siguiente epígrafe, se exponen los más afines a esta tesis.

III.1.2. Estudios recientes

PRIMERO.-En 1999, el profesor de la E.T.S de Náutica y Máquinas Navales de la Universidad del País Vasco, Ricardo Gaztelu-Iturri Leicea, presentó su tesis doctoral, titulada: *Influencia del magnetismo del buque en los desvíos de la aguja náutica. Métodos de compensación*. En ella, se expone un método que simplifica el proceso de la compensación preliminar a un borneo de tres rumbos (dos cardinales no opuestos y un cuadrantal). Este método también se explica en el libro *Compensación de la aguja náutica: curso de compensador*, que el autor publicó el mismo año, con el fin de desarrollar los contenidos del curso de compensador especificados en la Orden ministerial de 14 de diciembre de 1992 sobre compensación de agujas náuticas.

El método del profesor Gaztelu-Iturri, denominado compensación reducida, considera todo el proceso de la compensación; es decir: tanto la fase preliminar, como la definitiva en un segundo lugar. En lo referente a la compensación preliminar, marca un punto de partida para el desarrollo de la Parte IV de esta tesis, tanto por la forma de compensar, como por el hecho de que permite confeccionar la tablilla de los desvíos residuales sin necesidad de dar un segundo borneo, sino simplemente completando el borneo de tres rumbos con los otros cinco rumbos principales (cardinales y cuadrantales).

SEGUNDO.-En 2003, el profesor de la E.T.S de Náutica y Máquinas de la Universidad de La Coruña, Pedro Gea Vázquez, presentó su tesis doctoral, titulada: *Compensación del magnetismo accidental del desvío de escora mediante una tercera esfera; su influencia sobre el desvío cuadrantal*, en la cual se propone un método para compensar el desvío de escora que tenga en cuenta el efecto de la varilla vertical k.

El desvío de escora se compensa únicamente con imanes verticales, atribuyendo todo su efecto al imán vertical R. No obstante, si bien dicho imán es el que tiene mayor incidencia sobre este desvío, no es el único, pues las varillas g, h, k también influyen, y especialmente, la k. El método propuesto por el profesor Gea consiste en instalar una tercera esfera a proa del compás. Pero esta esfera afecta a las otras dos destinadas a compensar el desvío cuadrantal, que están instaladas a babor y a estribor del compás. Por consiguiente, también se analiza la influencia de la tercera esfera sobre el desvío cuadrantal.

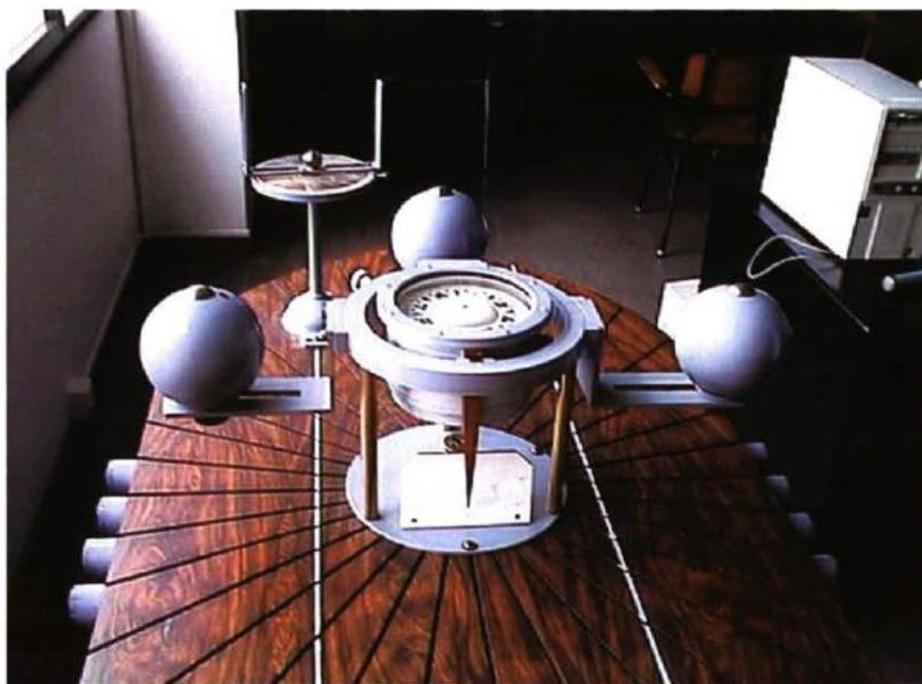


Figura 51. Desvioscopio con las tres esferas propuestas por el profesor Gea. Fuente: Gea, 2003, p. 172.

Así como el estudio del profesor Gaztelu-Iturri marca un precedente para esta tesis, el trabajo del profesor Gea es un estudio independiente. A pesar de ello, se ve la necesidad de incorporar su trabajo en la presente tesis, dado que supone una mejora en el rendimiento de los compases magnéticos, máxime cuando trata un aspecto que muchas veces queda relegado a un segundo plano, como es el desvío de escora, pero que es esencial para el buen funcionamiento del compás, ya que: si este desvío no está compensado, la aguja oscila con los balances, y se puede llegar a la situación de que sea imposible mantener el rumbo por causa de la oscilación, quedando por tanto, el compás magnético inoperativo.



Figura 52. Experimentación con el modelo de tres esferas. Fuente: Gea, 2003, p. 185.

TERCERO.-En 2009, el profesor de la E.T.S. de Náutica y Máquinas Navales de la Universidad del País Vasco, y codirector de esta tesis, Aitor Martínez-Lozares, presentó su tesis doctoral, titulada: *Compás magnético integral para la obtención de desvíos en tiempo real a partir de un sistema global de navegación por satélite (GNSS)*. En ella, el autor crea un dispositivo denominado compás magnético integral (CMI), que en esencia, consiste de dos partes:

- Una, formada por un compás con un mortero esférico, hecho de metacrilato transparente o material análogo, y hermético, en cuyo interior alberga un disco de material sintético adaptado al diámetro de la esfera. Este disco flota en el interior de un líquido anticongelante y transparente que llena la totalidad del mortero, y tiene grabada la rosa y acoplado el imán director. Este compás no requiere suspensión cardán, ya que el disco siempre permanece horizontal dentro de la esfera; ni tampoco dispone de piezas internas, como estilo y chapitel. Asimismo, el mortero está colocado en una bitácora que contiene los dispositivos correctores.
- Y otra parte, consistente en un panel PC con pantalla táctil o microcontrolador, al que se le conecta un sensor adaptado al mortero, además de conexión al girocompás, GPS y compás satelital, que mediante algoritmos computerizados, obtiene la tabla de desvíos en tiempo real.

Queda claro que en el CMI, la parte correspondiente a la esfera no necesita electricidad, aunque sí el equipo al que se conectan los compases giroscópico y satelital, el GPS y el sensor. De esta forma, se puede comparar, en todo momento, el rumbo de aguja con el verdadero. Además, al estar conectado al GPS, se conoce la posición, y por tanto, la declinación magnética, con lo cual, se obtienen los desvíos en tiempo real.

Aparte, los desvíos a los diferentes rumbos de aguja se almacenan en una memoria, de manera que siempre se dispone de una tablilla de desvíos residuales, confeccionada con los últimos datos registrados de cada rumbo. En consecuencia, el CMI puede proporcionar el rumbo verdadero en caso de fallo de los demás compases, lo cual también hace innecesaria la realización de la tablilla de los desvíos residuales tras la compensación.

En la siguiente figura, se observa el panel PC del CMI conectado a un compás magnético estándar. Es decir: en lugar de conectar el panel al mortero del CMI, se conecta a otro compás.

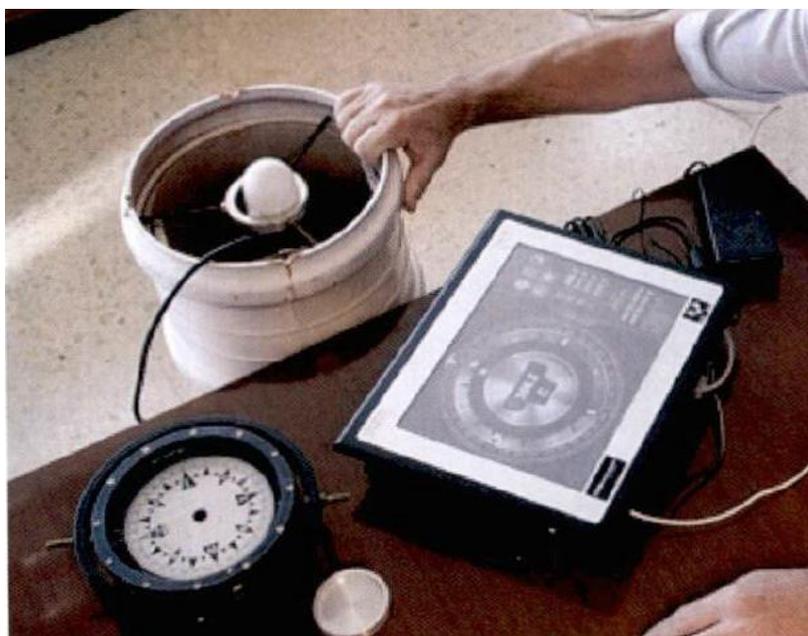


Figura 53. Panel PC del CMI conectado a un compás magnético estándar. Fuente: https://www.ehu.es/-/n_201610_josu-arribalaga-campusa?p_1_back_url=https%3A%2F%2Fwww.ehu.es%2Fes%2Fcampusa%2Fnewsletter%3Fp_p_id%3Dcom_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dmaximized%26p_p_mode%3Dview%26.com_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet_redirect%3Dhttps%253A%252F%252Fwww.ehu.es%252Fes%252Fcampusa%252Fnewsletter%253Fp_p_id%253Dcom_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet%2526p_p_lifecycle%253D0%2526p_p_state%253Dnormal%2526p_p_mode%253Dview%26.com_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet_mvcPath%3D%252Fsearch.jsp%26.com_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet_keywords%3DArribalaga%2BAurre%26.com_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet_formDate%3D1626516927379%26.com_liferay_portal_search_web_portlet_SearchPortlet_scope%3Deverything

Asimismo, como se muestra en las Figuras 61 y 62, el CMI proporciona:

- i) Una opción de rumbo, que puede ser: de aguja (opción C: compass); giroscópico (G: gyrocompass); satelital (S: satellite), o integral (I: integral), el cual da el rumbo verdadero como resultado de aplicar la dm y el desvío al rumbo de aguja.
- ii) Los coeficientes A,...,E de la ecuación práctica del desvío.
- iii) La tablilla de desvíos residuales, obtenida tanto analíticamente, aplicando la ecuación aproximada del desvío (con los coeficientes A,...,E), como por comparación directa del rumbo giroscópico o satelital con el de aguja, teniendo en cuenta la dm .



Figura 54. CMI indicando el rumbo de aguja; el menú con las opciones de rumbo, y los coeficientes A,...,E. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 133. (izda.)



Figura 55. CMI indicando el rumbo satelital; la tablilla de los desvíos, y los coeficientes A,...,E. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 134. (dcha.)

	arithmetic	deviation
000°	17.737°	17.737°
015°	16.836°	14.978°
030°	13.336°	11.029°
045°	3.933°	5.995°
060°	-0.268°	0.142°
075°	-6.471°	-6.123°
090°	-12.272°	-12.272°
105°	-15.273°	-17.718°
120°	-20.078°	-21.962°
135°	-24.381°	-24.381°
150°	-25.382°	-24.909°
165°	-27.284°	-23.834°
180°	-20.186°	-20.186°
195°	-16.088°	-15.544°
210°	-7.486°	-10.013°
225°	-4.186°	-4.128°
240°	0.215°	1.626°
255°	2.915°	6.865°
270°	11.335°	11.335°
285°	17.835°	14.900°
300°	17.835°	17.564°
315°	19.136°	19.127°
330°	20.336°	19.745°
345°	19.637°	19.380°

Figura 56. Tablilla de los desvíos proporcionada por el CMI, según estén obtenidos directamente por comparación del rumbo verdadero con el de aguja, teniendo en cuenta la dm (arithmetic), o calculados por la fórmula práctica del desvío (deviation). Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 116.

CUARTO.-En 2016, el profesor de la E.T.S. de Náutica y Máquinas Navales de la Universidad del País Vasco, Josu Arribalzaga Aurre, presentó su tesis doctoral, dirigida por el profesor Martínez-Lozares, y titulada: *Sistema de compensación simplificado del desvío semicircular para bitácora con compás de clase "A"*. En ella, el autor crea una bitácora en la que se sustituyen los imanes correctores clásicos, dispuestos en casilleros verticales, por un disco con imanes que se puede regular en altura, y toma como referencia el momento magnético de los imanes, en lugar del número de casillero. Con esto, se consigue un método más sencillo y preciso para efectuar la compensación.

El disco únicamente tiene cuatro imanes (concretamente, cuatro parejas), dispuestos de forma que sus centros estén separados 90° entre sí. Además, cada imán puede girar, con lo cual, cada pareja de imanes opuestos puede tener: un efecto desviador nulo, cuando se encuentran en su posición inicial, paralelos y con los polos opuestos (uno con el rojo a estribor y el otro con el rojo a babor); un efecto desviador máximo a estribor, cuando el que inicialmente tenía el polo rojo a babor, se gira 180°; un efecto desviador máximo a babor (caso análogo al anterior), y efectos intermedios.



Figura 57. Despiece del plato de compensación del dispositivo del profesor Arribalzaga. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 96. (arriba izda.)

Figura 58. Despiece del soporte del plato de compensación. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 96. (arriba centro)

Figura 59. Imanes empleados en el dispositivo y relación de su tamaño. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 104. (arriba dcha.)

Figura 60. Dispositivo compensador montado, listo para colocar en una bitácora. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 97. (debajo izda.)

Figura 61. Bitácora adaptada al dispositivo compensador. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 103. (debajo dcha.)

También se determina, tanto teórica como experimentalmente, el desvío que produce una pareja (en su posición de efecto desviador máximo) según la distancia a la que el disco se encuentre del compás. De esta forma, teniendo en cuenta que el imán P suele ser más intenso que el Q, la compensación se puede realizar del siguiente modo: se arrumba al E/W, con una pareja de imanes en su posición desviadora máxima y con la polaridad adecuada para corregir el coeficiente B, y se regula la altura del disco hasta anular el desvío; luego, al N/S, se gira la otra pareja el ángulo adecuado para anular el desvío, y finalmente, se anulan las mitades a los rumbos opuestos, ajustando el giro de los imanes.

Este dispositivo aumenta la distancia mínima de actuación de los imanes, que para sistemas convencionales, es de aproximadamente el triple de la longitud de los imanes correctores; mientras que en este, puede llegar a ser de cuatro veces dicha longitud, lo cual permite colocar los imanes más alejados de la rosa. De esta manera, se hace más difícil la inducción de los correctores de hierro dulce por causa de los imanes, según lo expuesto en el epígrafe II.4.2.

Se observa que este sistema mejora la eficacia de la compensación, y por tanto, combinándolo con el CMI (lo cual se hizo durante la fase experimental de la tesis del profesor Arribalzaga) y con los métodos de mejora de la eficiencia que se desarrollan en esta tesis, se puede lograr un gran avance en la efectividad de la compensación de agujas náuticas.



Figura 62. Mortero instalado en la bitácora con el dispositivo del profesor Arribalzaga. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 113.

QUINTO.-En 2015, Nicolás Ramsden San Juan, estudiante de la E.T.S. de Náutica y Máquinas Navales de la Universidad del País Vasco, realizó su TFM, dirigido también por el profesor Martínez-Lozares, y titulado: *Análisis de los desvíos de una aguja náutica mediante el estudio de sus valores cuadrantales*, en el cual aborda la problemática del quinto rumbo, realizando un estudio comparativo de las curvas de los desvíos residuales según el rumbo cuadrantal que se considere, tomando como referencia los datos obtenidos en las compensaciones de dos buques. El estudio pone de manifiesto el hecho de que un rumbo cuadrantal se desajusta, y que este no tiene porque ser el correspondiente al desvío mayor.

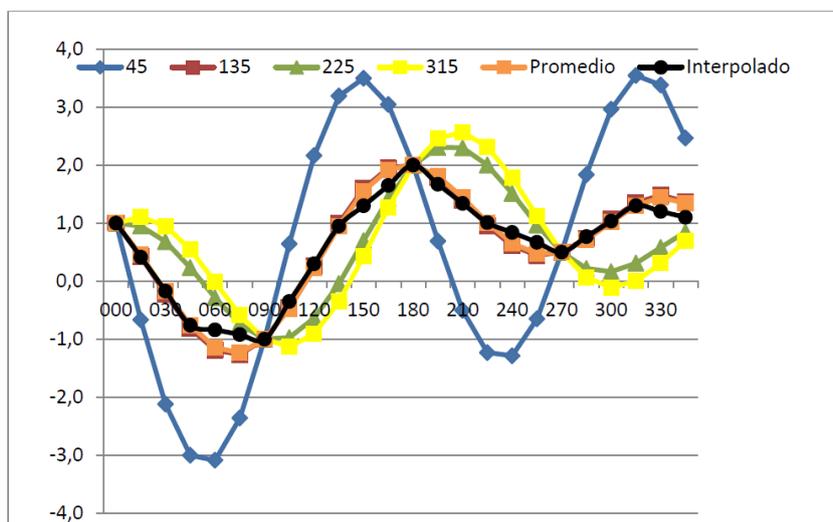


Figura 63. Curvas de los desvíos residuales del buque ALLURE OF THE SEAS, según sea el rumbo cuadrantal que se considere en la ecuación práctica del desvío, además de la curva obtenida con el coeficiente D medio (promedio) y la confeccionada por interpolación. Fuente: Ramsden, 2015, p. 104.

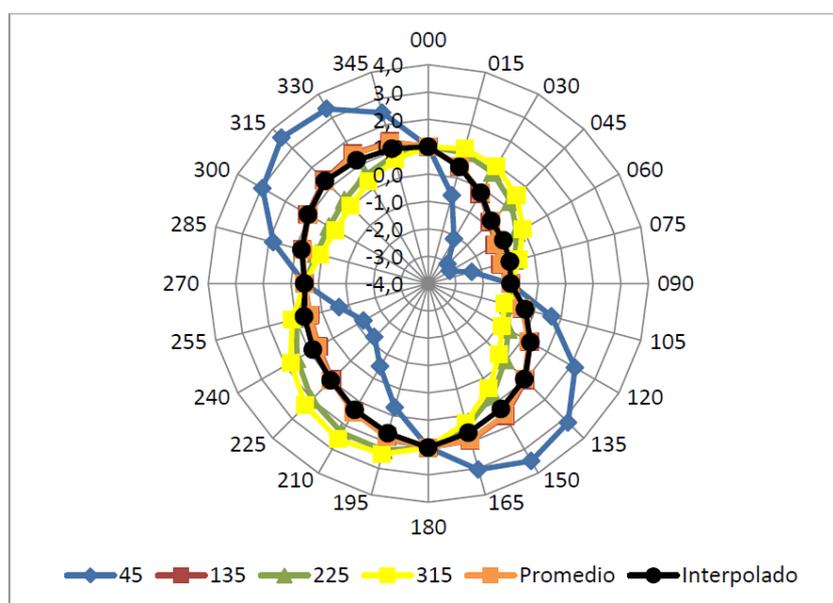


Figura 64. Gráficas polares de las curvas de la Figura 63. Fuente Ramsden, 2015, p. 104.

SEXTO.-En 2020, Conrad Guerra Piqué, estudiante de la Facultad de Náutica de Barcelona, realizó su TFG, dirigido por el autor de esta tesis, y titulado: *Análisis de la incidencia de los desvíos sextantal y octantal en el comportamiento de la aguja náutica*, el cual sigue la línea del TFM de Ramsden, pero considerando también los desvíos sextantal y octantal. A partir de los datos obtenidos en las compensaciones de los dos buques del TFM de Ramsden y de dos más, se comparan las curvas de los desvíos residuales que se obtienen para cada uno de los cuatro buques, considerando los desvíos a los rumbos cardinales (de los que dependen los coeficientes A, B, C, E) y:

i) el coeficiente D medio: $D = \frac{1}{4} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw} - \Delta_{se} - \Delta_{nw})$

ii) el coeficiente D que se obtiene con el desvío a un solo rumbo cuadrantal:

$$D = \Delta_{ne} - A - B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707 \quad D = \Delta_{se} + A + B \cdot 0,707 - C \cdot 0,707$$

$$D = \Delta_{sw} - A + B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707 \quad D = \Delta_{nw} + A - B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707$$

iii) los coeficientes A, ..., K de la ecuación que tiene en cuenta los desvíos sextantal y octantal. En este caso, los coeficientes A, B, C tienen valores distintos a los coeficientes obtenidos únicamente a partir de los desvíos a los rumbos cardinales, los cuales se han empleado en los casos anteriores.

El análisis de las diferentes curvas evidencia de nuevo la existencia de un rumbo cuadrantal que se desajusta. Asimismo, también se observa que la curva obtenida mediante los coeficientes A, ..., K no queda bien modulada. En cambio, la curva obtenida con el coeficiente D medio, aunque no se ajusta exactamente a ninguno de los cuatro desvíos cuadrantales, es la más estética y la que tiene los desvíos extremos (máximos y mínimos de la curva) menores.

SÉPTIMO.-En 2011, el profesor de la Academia Marítima de Stettin (Polonia) / *Szczecin Maritime Academy*, Evgeny M. Lushnikov, publicó en *TransNav Journal*, un artículo titulado: *Compensation of magnetic compass deviation at single any course*. En él, se propone un método para actualizar la tablilla de desvíos existente a bordo a un solo rumbo, evitando así cualquier borneo, y por tanto, una pérdida de tiempo operacional para los buques. El fundamento del método radica en dos aspectos:

i) Las varillas y el factor λ_2 dependen del tipo de acero, así como del tamaño y la forma del buque, que son parámetros casi siempre constantes (o con muy poca variación) desde la construcción de un buque. Por tanto, los valores de los coeficientes A, D, E tienen una elevada estabilidad a lo largo del tiempo, y en consecuencia, una vez se ha efectuado la primera compensación de un buque, sus valores residuales son prácticamente constantes, de manera que: en las sucesivas compensaciones, solo se habrán alterado significativamente los coeficientes B, C, los cuales dependen de los imanes P, Q, que sí sufre variaciones con el transcurso del tiempo.

ii) A pesar de lo establecido en el apartado G2 de la Norma ISO 25862, cada Administración estipula el periodo de tiempo máximo en el que se debe actualizar la tablilla de desvíos, así como los requisitos mínimos que debe tener esta actualización. En este sentido, la Orden ministerial española de 1992, igual que la Norma ISO, establece que: en un periodo máximo de dos años, se debe volver a compensar la aguja. No obstante, hay normas nacionales que obligan a revisar la tablilla anualmente, y a la vez, otras normas (o estas mismas) establecen requisitos que no hacen necesario llevar a cabo la compensación. Así por ejemplo, la Orden ministerial rusa de 1989 no define el tiempo de actualización de la tablilla de desvíos, sino que solo determina el nivel de precisión que debe tener.

En consecuencia, hay supuestos en los que: restableciendo los desvíos a los valores de la tablilla existente, se podría prorrogar la validez de la misma durante un año. El método está enfocado a estos casos, y asume que los coeficientes A, D, E de la tablilla existente no han variado, con lo cual, se deben ajustar únicamente los coeficientes B, C actuales al valor original de la tablilla. Es decir: se trata de determinar los valores actuales de los coeficientes B, C, y con ellos, las variaciones que se deben aplicar, mediante los correctores, para restablecer los valores de dichos coeficientes a los que figuran en la tablilla (o que se desprenden de sus desvíos), considerando para ello, que los coeficientes A, D, E, λ_2 son los mismos que también figuran en la tablilla (o que se desprenden de sus desvíos).

Conociendo el desvío (Δ) a un rumbo dado (el cual, el professor Lushnikov recomienda que no se determine con el buque atracado, a fin de evitar el magnetismo de los elementos del puerto, sino que se tome con el buque fuera de puerto), se tiene:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' \Rightarrow B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' = \Theta_1$$

donde $\Theta_1 = \Delta - A - D \cdot \sin 2R' - E \cdot \cos 2R'$

Asimismo, de la expresión de la fuerza directriz (F_n), se desprende que:

$$F_n = H' \cdot \cos \Delta = \lambda_2 \cdot H \cdot (1 + \beta \cdot \cos R' - \gamma \cdot \sin R' + \delta \cdot \cos 2R' - \varepsilon \cdot \sin 2R')$$

$$H' \cdot \cos \Delta = \lambda_2 \cdot H \cdot (1 + B \cdot \sin 1^\circ \cdot \cos R' - C \cdot \sin 1^\circ \cdot \sin R' + D \cdot \sin 1^\circ \cdot \cos 2R' - E \cdot \sin 1^\circ \cdot \sin 2R')$$

siendo H' la fuerza horizontal total que hay en el emplazamiento del compás cuando el buque sigue el rumbo R' . Por tanto,

$$\left(\frac{H'}{H} \cdot \frac{\cos \Delta}{\lambda_2} - 1 \right) \cdot \csc 1^\circ = B \cdot \cos R' - C \cdot \sin R' + D \cdot \cos 2R' - E \cdot \sin 2R' \Rightarrow B \cdot \cos R' - C \cdot \sin R' = \Theta_2$$

donde $\Theta_2 = \left(\frac{H'}{H} \cdot \frac{\cos \Delta}{\lambda_2} - 1 \right) \cdot \csc 1^\circ - D \cdot \cos 2R' + E \cdot \sin 2R'$

La relación H'/H se puede obtener mediante un desviador o deflector (instrumento no explicado en esta tesis, por el motivo citado en el apartado *Metodología*), como indica el professor Lushnikov, o con una aguja oscilante, como se ha expuesto en el epígrafe I.1.7. En cualquier caso, una vez determinada esta relación, se tienen dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' = \Theta_1$$

$$B \cdot \cos R' - C \cdot \sin R' = \Theta_2$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtienen los coeficientes B, C, cuyos valores deben ser modificados en las siguientes cantidades:

Variación de B = B - B de la tablilla de desvíos

Variación de C = C - C de la tablilla de desvíos

OCTAVO: En 1999, el profesor de la Academia Naval Polaca, Andrzej Felski, publicó en *Journal of Navigation*, un artículo titulado: *Application of the least squares method for determining magnetic compass deviation*. En él, se aplica el método de ajustes por mínimos cuadrados para confeccionar la tablilla de los desvíos residuales a partir de los desvíos tomados a los diferentes rumbos, para lo cual, la función a la que deben ajustarse los datos obtenidos es la fórmula práctica de la ecuación del desvío, la cual es una serie de Fourier. Aunque se trate de un método destinado a eliminar errores accidentales, también se puede ver como un método con el mismo propósito que el de los trabajos de Ramsden y Guerra, puesto que: así como estos se basan en la selección de desvíos y coeficientes, el professor Felski determina la serie de Fourier por el método de ajuste por mínimos cuadrados; pero ambos buscan conseguir una curva suavizada cuyos valores se ajusten suficientemente a los desvíos obtenidos

NOVENO.-En 2011, el profesor de la E.T.S. de Náutica y Máquinas Navales de la Universidad del País Vasco, Imanol Basterretxea Iribar, presentó su tesis doctoral, titulada: *Obtención de un modelo magnético de buque y su aplicación en el análisis de las variaciones del desvío causadas por el cambio de posición geográfica*. Asimismo, en 2014, junto con otros autores, publicó en *Polish Maritime Research*, un artículo titulado: *Latitude error in compass deviation: mathematical method to determine the latitude error in magnetic compass deviation*. En estos trabajos, se determina la curva de los desvíos residuales que el buque tiene en una posición geográfica diferente a la que se realizó la compensación. Al igual que el professor Lushnikov, parte del hecho de que los coeficientes A, D, E son invariantes, mientras que los coeficientes B, C cambian con la situación del buque. Tal como se explicó en el epígrafe II.5.2, en un lugar diferente del que se efectuó la compensación, se determinan los coeficientes B_2 , C_2 , y a partir de ellos, conociendo los componentes H, Z en el lugar de la compensación (H_1 , Z_1) y en el segundo lugar (H_2 , Z_2), se obtienen los valores de los imanes P, Q y de las varillas c, f. Concretamente, el professor Basterretxea calcula las relaciones P/λ_2 , Q/λ_2 , c/λ_2 , f/λ_2 , ya que no es necesario determinar el valor de λ_2 . Y al igual que el profesor Martínez-Lozares, los elementos del campo magnético terrestre los obtiene mediante un calculador *on line* (NOAA, Magnetic fields values calculator). Además, cada uno de los coeficientes B_2 , C_2 se puede determinar a un solo rumbo: $B_2 = \Delta e - A + E = -\Delta w + A - E$; $C_2 = \Delta n - A - E = -\Delta s + A + E$. Por tanto, una vez obtenidas las relaciones P/λ_2 , Q/λ_2 , c/λ_2 , f/λ_2 , se puede calcular el valor de los coeficientes B, C en cualquier posición geográfica, y en consecuencia, también el desvío en cualquier lugar. De esta manera, se puede disponer de una tablilla o curva de desvíos *corregida por latitud* (es decir: reconfeccionada para cada lugar), para lo cual, solo se requiere un programa que realice los cálculos.

Cabe destacar también, que el profesor Basterretxea aplica el método de ajuste por mínimos cuadrados propuesto por el profesor Fielski, de forma que: con los desvíos de la tablilla, obtiene unos nuevos coeficientes mediante su ajuste por mínimos cuadrados, y con ellos, una nueva curva de desvíos más suavizada, como se indica en la Figura 72.

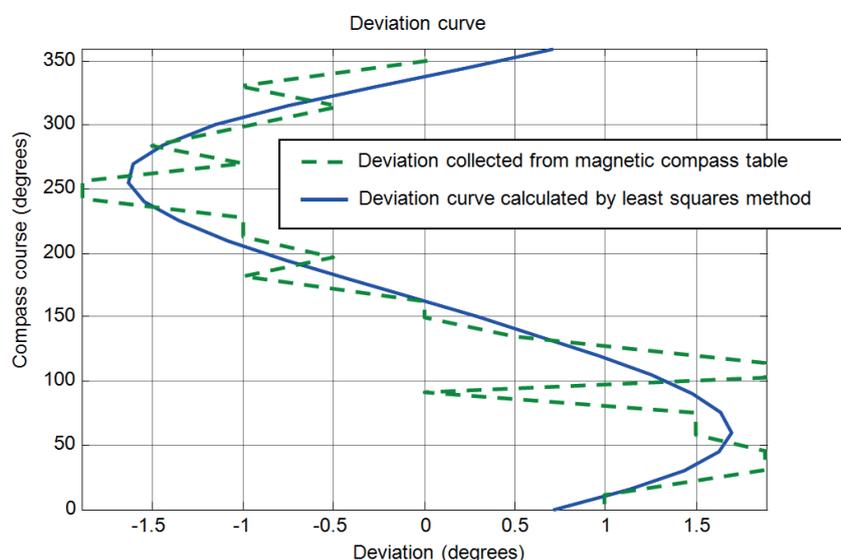


Figura 65. Curvas de desvíos del petrolero MONTE TOLEDO, según los datos de su tablilla de desvíos y según el ajuste de dichos datos por mínimos cuadrados. Fuente: *Polish Maritime Research*, No 3/2014, p. 26.

Como se ha indicado, con un programa se pueden efectuar los cálculos para obtener la tablilla o curva de desvíos *corregida por latitud*, y presentar los datos en un formato adecuado, como es el caso de las Figuras 73, 74, 75 y 76, correspondientes a la aguja del petrolero MONTE TOLEDO. La curva azul es la del lugar donde se efectuó la compensación (27°N 091°W) ajustada por el método de mínimos cuadrados, y las curvas rojas son las curvas *corregidas por latitud* en diferentes posiciones geográficas, en las que: los coeficientes B, C de la curva anterior, se han recalculado con los valores de H, Z del lugar.

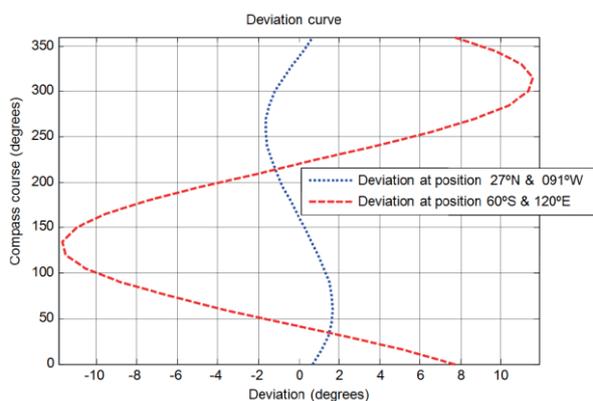


Figura 66. Curvas de desvíos del petrolero MONTE TOLEDO: Azul, en el lugar de la compensación (27°N 091°W); Roja, en 60°S 120°E. Fuente: *Polish Maritime Research*, No 3/2014, p. 28. (izda.)

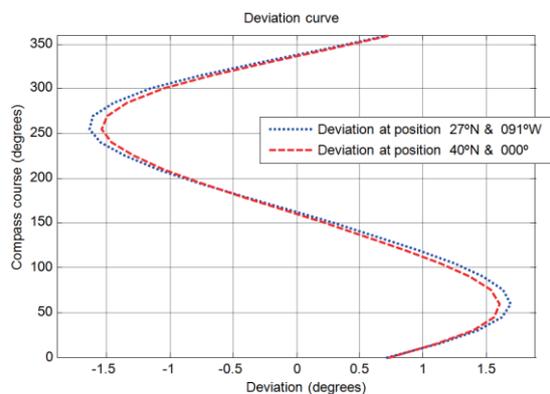


Figura 67. Curvas de esvíos del petrolero MONTE TOLEDO: Azul, en el lugar de la compensación (27°N 091°W); Roja, en 40°N 000°E. Fuente: *Polish Maritime Research*, No 3/2014, p. 29. (dcha.)

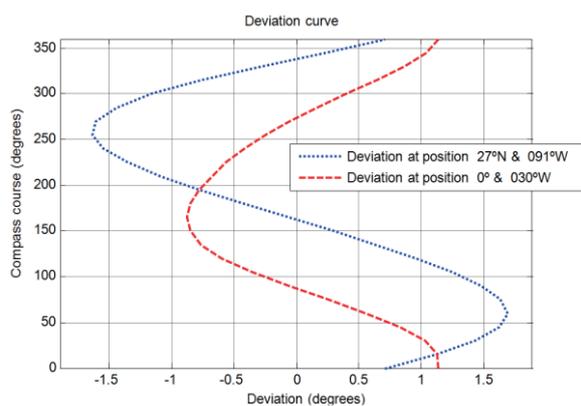


Figura 68. Curvas de desvíos del petrolero MONTE TOLEDO: Azul, en el lugar de la compensación (27°N 091°W); Roja, en 0° 030°W. Fuente: *Polish Maritime Research*, No 3/2014, p. 29. (izda.)

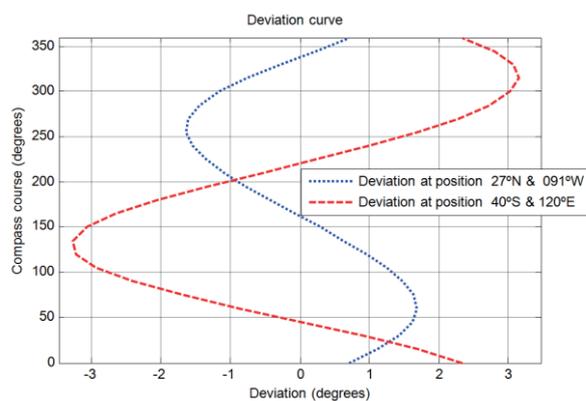


Figura 69. Curvas de desvíos del petrolero MONTE TOLEDO: Azul, en el lugar de la compensación (27°N 091°W); Roja, en 40°S 120°E. Fuente: *Polish Maritime Research*, No 3/2014, p. 29. (dcha.)

Se observa que la curva *corregida por latitud* de la Figura 73 tiene valores muy elevados. Esto es debido a que la situación es muy próxima al polo sur magnético. En cambio, la curva corregida de la Figura 74 es prácticamente igual a la del lugar de la compensación. Asimismo, todas las curvas son de tipo semicircular, y las curvas corregidas de las Figuras 73 (para 60°S 120°E) y 76 (para 40°S 120°E) tienen prácticamente la misma forma, aunque diferente amplitud. En el artículo, se puede observar que esto también sucede con la curva corregida para la situación de 20°S 120°E, apreciándose como: al aumentar la latitud, aumentan los desvíos.

DÉCIMO.-Para finalizar este epígrafe, se citan dos artículos que no se encuentran relacionados directamente con esta tesis, pero que están dirigidos a la formación relativa al compás magnético y a su compensación. La razón de mencionarlos es que la proyección en la docencia es parte de la motivación de esta tesis.

En el Congreso Internacional de Realidad Virtual y Visualización de 2015, el profesor de la Universidad Marítima de Dailan (China) / *Dailan Maritime University*, Xiao Yang, junto con otros autores, presentó un artículo titulado: *Realization of 3D virtual magnetic compass and evaluation system*, en el que se describe un compás magnético virtual en 3D con todas sus partes (bitácora, mortero, esferas, barra Flinders e imanes correctores). El objetivo es poder impartir y evaluar las competencias sobre compases magnéticos a nivel operacional: estructura y mantenimiento del compás, y obtención de los desvíos. Con respecto al conocimiento de la estructura, aparece una pregunta en la pantalla, y el alumno debe identificar la parte del compás indicada y seleccionar su función (aparecen las funciones de todas las partes). Con respecto al mantenimiento, el alumno puede seleccionar imanes y herramientas virtuales, a fin de: verificar la sensibilidad y el semiperiodo del compás, y si hay una burbuja en el mortero, eliminarla, rellenando el mortero con el líquido adecuado. Y con respecto a la obtención del desvío, el sistema permite cuatro métodos: tomar el azimut de aguja del sol; tomar la demora de aguja a

una referencia de tierra; comparar el rumbo de aguja con el giroscópico, y consultar la tablilla de desvíos. Para ello, el buque navega en un escenario en el que hay un conjunto de referencias de tierra preparadas para la evaluación, así como el sol en su posición (azimut y altura) según la situación del buque, el día y la hora. De esta manera, es posible practicar y evaluar competencias que, con un compás magnético real en clase, no siempre se podrían practicar y evaluar.



Figura 70. Compás magnético virtual en 3D: operación de eliminar la burbuja, rellenando el mortero con el líquido adecuado. Fuente: *2015 International Conference on Virtual Reality and Visualization*, p. 315.

Asimismo, en 2010, el profesor de la Escuela de Navegación de la Universidad de Tecnología de Wuhan (China) / *School of Navigation, Wuhan University of Technology*, Jianhua Wu, junto con otros autores, publicó en *Advanced Materials Research*, un artículo titulado: *3D interactive simulation of magnetic compass adjustment based on VRML*, en el que se describe la simulación en 3D de un compás magnético con todos sus correctores, a modo de desvioscopio virtual, para la formación en compensación de agujas náuticas. El modelo permite compensar los desvíos semicircular, cuadrantal y de escora, dando al alumno un conocimiento completo de las técnicas de compensación, y sin ninguna limitación operativa, como puede suceder en una clase magistral, a bordo de un buque o incluso en un desvisocopio.

III.1.3. Conclusiones

Si bien se han llevado a cabo varios estudios y avances destinados a mejorar el rendimiento de los compases magnéticos, como ya se apuntó en el apartado *Metodología*, estos avances no se han interrelacionado entre sí, con el fin de conseguir un sistema global en la mejora de la efectividad de los compases magnéticos y de su compensación. El motivo de ello es que cada uno de estos trabajos, incluida esta tesis, busca objetivos específicos y no transversales. Por tanto, la mejora global viene dada, simplemente, por la suma de las distintas innovaciones, siendo un ejemplo de ello, el hecho de que en el método propuesto por el profesor Basterretxea, se efectúa el ajuste por mínimos cuadrados que el profesor Felski aplica a los desvíos residuales.

En cuanto a esta tesis, se considera la compensación reducida propuesta por el profesor Gaztelu-Iturri como el punto de partida para lograr el objetivo de reducir el número de rumbos a seguir durante el proceso de compensación. Además, también se consideran los resultados del TFM de Ramsden y del TFG de Guerra. Y tanto en esta tesis, como en la del profesor Arribalzaga, se ha empleado el CMI del profesor Martínez-Lozares en el trabajo de campo.

PARTE IV: CASOS DE ESTUDIO

IV.1. Empleo del GPS en la compensación

IV.1.1. Planteamiento de un método adecuado para el uso del GPS

El compás giroscópico es muy útil para seguir los rumbos magnéticos. No obstante, solo es obligatorio en buques de 500 TRB o más, de acuerdo con SOLAS V/19.2.5.1. Por tanto, hay embarcaciones en las que el único indicador de rumbo es el compás magnético, de manera que: para compensarlo, se deben seguir enfilaciones, o bien tomar demoras a un punto lejano y conspicuo de tierra (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 80) o azimutes del sol (NGA, 2004, pp. 35–38). Para agilizar el proceso, se ha propuesto comparar los rumbos de aguja con los rumbos efectivos que proporciona el GPS, a fin de determinar los coeficientes A,...,E de la ecuación del desvío, y poder compensar y confeccionar la tablilla de los desvíos residuales a partir de ellos.

Así como el ECDIS considera los vectores (HDG, STW) y (COG, SOG), siendo la diferencia entre ellos, el vector (*Set, Drift*)¹⁹, el método propuesto también atribuye toda la diferencia entre el rumbo verdadero y el rumbo efectivo a una corriente desconocida, la cual se refiere al conjunto de fuerzas externas a la que está sometida la embarcación, como la corriente propiamente dicha, la fuerza del viento o el efecto del oleaje.

IV.1.2. Desarrollo del método

El desarrollo del método parte del triángulo de velocidades (Figura 71).

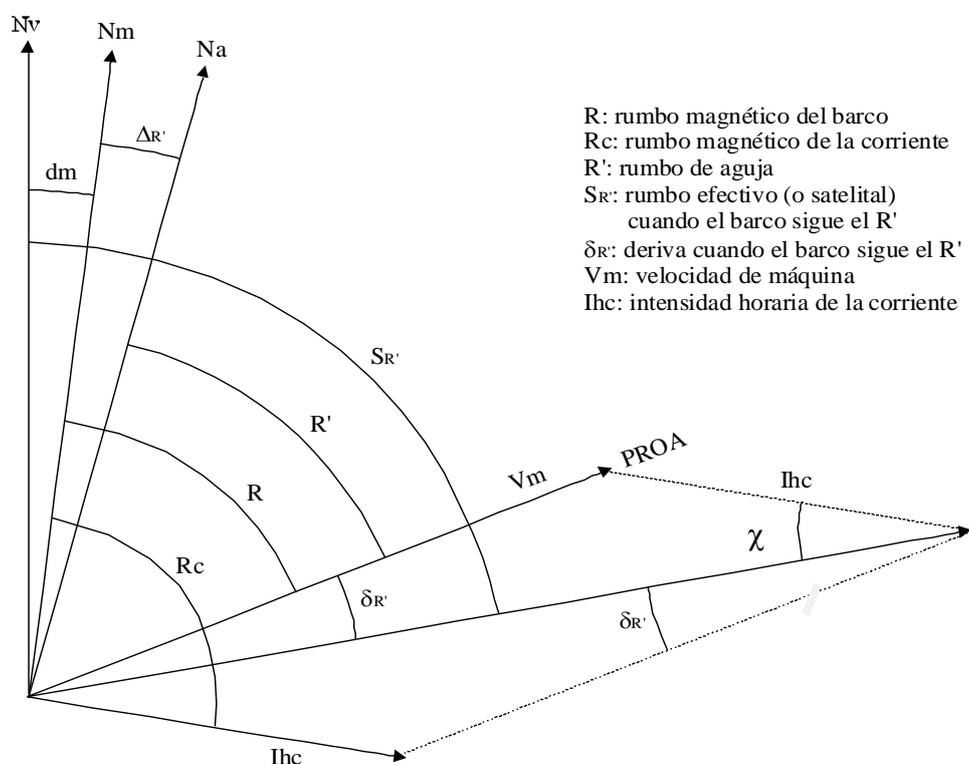


Figura 71. Tipos de rumbos y triángulo de velocidades. Fuente: Propia.

¹⁹ Vide HDG, STW, COG, SOG, Set, Drift en la Lista de símbolos y abreviaturas.

Por conveniencia, la dirección de la corriente se expresa mediante un rumbo magnético, en lugar de un rumbo verdadero. Asimismo, de acuerdo con el teorema de los senos,

$$\frac{V_m}{\sin \chi} = \frac{I_{hc}}{\sin \delta_{R'}} \Rightarrow \sin \delta_{R'} = \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \sin \chi$$

Pero $\chi + \delta_{R'} = R_c - R$, ya que son ángulos opuestos de un paralelogramo. Luego,

$$\sin \delta_{R'} = \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \sin(R_c - R - \delta_{R'})$$

Desarrollando,

$$\sin \delta_{R'} = \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \sin(R_c - R) \cdot \cos \delta_{R'} - \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \cos(R_c - R) \cdot \sin \delta_{R'}$$

$$\sin \delta_{R'} \cdot \left[1 + \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \cos(R_c - R) \right] = \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \sin(R_c - R) \cdot \cos \delta_{R'} \Rightarrow \tan \delta_{R'} = \frac{\frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \sin(R_c - R)}{1 + \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \cos(R_c - R)}$$

Puesto que $(a + b) \cdot (a - b) = a^2 - b^2$, multiplicando el numerador y el denominador por $1 - I_{hc}/V_m \cdot \cos(R_c - R)$, se tiene:

$$\tan \delta_{R'} = \frac{\frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \sin(R_c - R) \cdot \left[1 - \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \cos(R_c - R) \right]}{1 - \frac{I_{hc}^2}{V_m^2} \cdot \cos^2(R_c - R)}$$

Pero I_{hc}^2 es mucho menor que V_m^2 , con lo cual, el denominador se puede considerar 1. Además, por ser la deriva un ángulo pequeño, se puede sustituir su tangente por su seno, y este por $\delta_{R'} \cdot \sin 1^\circ$. Por tanto,

$$\delta_{R'} \cdot \sin 1^\circ = \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \sin(R_c - R) - \frac{I_{hc}^2}{V_m^2} \cdot \sin(R_c - R) \cdot \cos(R_c - R)$$

Sea $w = \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \csc 1^\circ$, con lo cual,

$$\delta_{R'} = w \cdot \sin(R_c - R) - w^2 \cdot \sin 1^\circ \cdot \sin(R_c - R) \cdot \cos(R_c - R)$$

donde:

$$\begin{aligned} \sin(R_c - R) &= \sin R_c \cdot \cos R - \cos R_c \cdot \sin R \\ \cos(R_c - R) &= \cos R_c \cdot \cos R + \sin R_c \cdot \sin R \end{aligned}$$

Sean ahora:

$$\left. \begin{aligned} w \cdot \cos R_c &= x \\ w \cdot \sin R_c &= y \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} w \cdot \sin(R_c - R) = -x \cdot \sin R + y \cdot \cos R \\ w \cdot \cos(R_c - R) = x \cdot \cos R + y \cdot \sin R \end{cases}$$

En consecuencia,

$$\begin{aligned}
 w^2 \cdot \sin(Rc - R) \cdot \cos(Rc - R) &= (-x \cdot \sin R + y \cdot \cos R) \cdot (x \cdot \cos R + y \cdot \sin R) = \\
 &= -x^2 \cdot \sin R \cdot \cos R - x \cdot y \cdot \sin^2 R + x \cdot y \cdot \cos^2 R + y^2 \cdot \sin R \cdot \cos R = \\
 &= x \cdot y \cdot \cos 2R - \frac{1}{2}(x^2 - y^2) \cdot \sin 2R
 \end{aligned}$$

Luego,

$$\delta_{R'} = -x \cdot \sin R + y \cdot \cos R - x \cdot y \cdot \sin 1^\circ \cdot \cos 2R + \frac{1}{2}(x^2 - y^2) \cdot \sin 1^\circ \cdot \sin 2R$$

Y sustituyendo R por R',

$$\delta_{R'} = -x \cdot \sin R' + y \cdot \cos R' - x \cdot y \cdot \sin 1^\circ \cdot \cos 2R' + \frac{1}{2}(x^2 - y^2) \cdot \sin 1^\circ \cdot \sin 2R'$$

Ahora bien:

$$\Delta_{R'} = R - R' = R_v - dm - R' = S_{R'} - \delta_{R'} - dm - R'$$

Sea el pseudodesvío (Ψ) la diferencia entre el rumbo efectivo y el de aguja, con lo cual,

$$\Delta_{R'} = \Psi_{R'} - \delta_{R'} - dm$$

$$A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' = \Psi_{R'} - \delta_{R'} - dm$$

De manera que:

$$\begin{aligned}
 \Psi_{R'} &= A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + \delta_{R'} + dm - \\
 &- x \cdot \sin R' + y \cdot \cos R' - x \cdot y \cdot \sin 1^\circ \cdot \cos 2R' + \frac{1}{2}(x^2 - y^2) \cdot \sin 1^\circ \cdot \sin 2R'
 \end{aligned}$$

Particularizando para los cuatro rumbos de aguja cardinales, resulta:

$$\Psi_n = A + C + E + dm + y - x \cdot y \cdot \sin 1^\circ$$

$$\Psi_e = A + B - E + dm - x + x \cdot y \cdot \sin 1^\circ$$

$$\Psi_s = A - C + E + dm - y - x \cdot y \cdot \sin 1^\circ$$

$$\Psi_w = A - B - E + dm + x + x \cdot y \cdot \sin 1^\circ$$

Por tanto,

$$\Psi_n + \Psi_e + \Psi_s + \Psi_w = 4(A + dm) \Rightarrow A = \frac{1}{4}(\Psi_n + \Psi_e + \Psi_s + \Psi_w) - dm$$

$$\Psi_e - \Psi_w = 2(B - x) \Rightarrow B = \frac{1}{2}(\Psi_e - \Psi_w) + x$$

$$\Psi_n - \Psi_s = 2(C + y) \Rightarrow C = \frac{1}{2}(\Psi_n - \Psi_s) - y$$

$$\Psi_n + \Psi_s - \Psi_e - \Psi_w = 4(E - x \cdot y \cdot \sin 1^\circ) \Rightarrow E = \frac{1}{4}(\Psi_n + \Psi_s - \Psi_e - \Psi_w) + x \cdot y \cdot \sin 1^\circ$$

Y particularizando para los cuatro rumbos de aguja cuadrantales, se tiene:

$$\Psi_{ne} = A + B \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + C \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + dm - x \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + y \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{2}(x^2 - y^2) \cdot \sin 1^\circ$$

$$\Psi_{se} = A + B \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - C \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + dm - x \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - y \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{1}{2}(x^2 - y^2) \cdot \sin 1^\circ$$

$$\Psi_{sw} = A - B \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - C \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + dm + x \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - y \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{2}(x^2 - y^2) \cdot \sin 1^\circ$$

$$\Psi_{nw} = A - B \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + C \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + dm + x \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + y \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{1}{2}(x^2 - y^2) \cdot \sin 1^\circ$$

Por consiguiente,

$$\Psi_{ne} + \Psi_{se} + \Psi_{sw} + \Psi_{nw} = 4(A + dm) \Rightarrow A = \frac{1}{4}(\Psi_{ne} + \Psi_{se} + \Psi_{sw} + \Psi_{nw}) - dm$$

$$\Psi_{ne} + \Psi_{se} - \Psi_{sw} - \Psi_{nw} = 2\sqrt{2} \cdot (B - x) \Rightarrow B = \frac{\sqrt{2}}{4}(\Psi_{ne} + \Psi_{se} - \Psi_{sw} - \Psi_{nw}) + x$$

$$\Psi_{ne} + \Psi_{nw} - \Psi_{se} - \Psi_{sw} = 2\sqrt{2} \cdot (C + y) \Rightarrow C = \frac{\sqrt{2}}{4}(\Psi_{ne} + \Psi_{nw} - \Psi_{se} - \Psi_{sw}) - y$$

$$\Psi_{ne} + \Psi_{sw} - \Psi_{se} - \Psi_{nw} = 4\left[D + \frac{1}{2}(x^2 - y^2)\right] \Rightarrow D = \frac{1}{4}(\Psi_{ne} + \Psi_{sw} - \Psi_{se} - \Psi_{nw}) - \frac{1}{2}(x^2 - y^2)$$

A partir de las dos expresiones de A, B, C, también se obtiene una nueva expresión para cada uno de estos coeficientes:

$$A = \frac{1}{8}(\Psi_n + \Psi_s + \Psi_e + \Psi_w + \Psi_{ne} + \Psi_{se} + \Psi_{sw} + \Psi_{nw}) - dm$$

$$B = \frac{1}{4}[\Psi_e - \Psi_w + \frac{\sqrt{2}}{2}(\Psi_{ne} + \Psi_{se} - \Psi_{sw} - \Psi_{nw})] + x$$

$$C = \frac{1}{4}[\Psi_n - \Psi_s + \frac{\sqrt{2}}{2}(\Psi_{ne} + \Psi_{nw} - \Psi_{se} - \Psi_{sw})] - y$$

De estos resultados, se desprende que el único coeficiente que se puede calcular únicamente a partir de los pseudodesvíos es el A. Los demás dependen de x, y, cuyas expresiones son:

$$x = w \cdot \cos R = \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \csc 1^\circ \cdot \cos R_c \cong 57,3 \cdot \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \cos R_c$$

$$y = w \cdot \sin R = \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin R_c \cong 57,3 \cdot \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \sin R_c$$

Y por tanto,

$$x \cdot y \cdot \sin 1^\circ = \frac{I_{hc}^2}{V_m^2} \cdot \csc^2 1^\circ \cdot \cos R_c \cdot \sin R_c \cdot \sin 1^\circ = \frac{I_{hc}^2}{V_m^2} \cdot \csc 1^\circ \cdot \frac{1}{2} \sin 2R_c = 28,65 \cdot \frac{I_{hc}^2}{V_m^2} \cdot \sin 2R_c$$

$$\frac{1}{2}(x^2 - y^2) \cdot \sin 1^\circ = \frac{1}{2} \left(\frac{I_{hc}^2}{V_m^2} \cdot \csc^2 1^\circ \cdot \cos^2 R_c - \frac{I_{hc}^2}{V_m^2} \cdot \csc^2 1^\circ \cdot \sin^2 R_c \right) \cdot \sin 1^\circ$$

$$\frac{1}{2}(x^2 - y^2) \cdot \sin 1^\circ = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_{hc}^2}{V_m^2} \cdot \csc 1^\circ \cdot (\cos^2 R_c - \sin^2 R_c) = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_{hc}^2}{V_m^2} \cdot \csc 1^\circ \cdot \cos 2R_c$$

$$\frac{1}{2}(x^2 - y^2) \cdot \sin 1^\circ = 28,65 \cdot \frac{I_{hc}^2}{V_m^2} \cdot \cos 2R_c$$

Con lo cual,

$$B = \frac{1}{2}(\Psi_e - \Psi_w) + 57,3 \cdot \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \cos R_c$$

$$C = \frac{1}{2}(\Psi_n - \Psi_s) + 57,3 \cdot \frac{I_{hc}}{V_m} \cdot \sin R_c$$

$$D = \frac{1}{4}(\Psi_{ne} + \Psi_{sw} - \Psi_{se} - \Psi_{nw}) - 28,65 \cdot \frac{I_{hc}^2}{V_m^2} \cdot \cos 2R_c$$

$$E = \frac{1}{4}(\Psi_n + \Psi_s - \Psi_e - \Psi_w) + 28,65 \cdot \frac{I_{hc}^2}{V_m^2} \cdot \sin 2R_c$$

IV.1.3. Discusión del método

Las expresiones de B, C no son fiables para calcular dichos coeficientes, puesto que el factor $57,3 \cdot I_{hc}/V_m$ puede introducir un error considerable. Sin embargo, se observa que: con una velocidad suficiente, la relación I_{hc}^2/V_m^2 es muy pequeña, y por tanto, se puede obviar en las expresiones de los coeficientes D, E. Así por ejemplo, para una relación ya bastante crítica de $V_m/I_{hc} = 5$ (como puede ser una embarcación navegando a 5 nudos en el seno de una corriente de 1 nudo, o una embarcación navegando a 10 nudos con una corriente de 2), el error máximo cometido en el cálculo de los coeficientes D, E sería de 1°. A continuación, se muestra este error según la relación V_m/I_{hc} .

V_m/I_{hc}	5	6	7	8	9	10	11	12
Máx. error: $28,65 \cdot I_{hc}^2/V_m^2$	1,1460	0,7958	0,5847	0,4477	0,3537	0,2865	0,2368	0,1990

Tabla 8. Máximo error cometido en los coeficientes D, E según la relación V_m/I_{hc} . Fuente: Propia.

Estos resultados ponen de manifiesto que, efectivamente, se puede despreciar la incidencia de la corriente en la determinación de los coeficientes D, E, y en consecuencia, se puede considerar:

$$D = \frac{1}{4}(\Psi_{ne} + \Psi_{sw} - \Psi_{se} - \Psi_{nw})$$

$$E = \frac{1}{4}(\Psi_n + \Psi_s - \Psi_e - \Psi_w)$$

En resumen:

- i) El coeficiente A se puede determinar únicamente a partir de los pseudodesvíos. También se debe aplicar la dm.
- ii) Los coeficientes D, E se pueden determinar únicamente a partir de los pseudodesvíos, pero cometiendo un pequeño error, el cual se puede obviar si se lleva una velocidad suficientemente alta. Concretamente, el error se puede obviar a partir de una relación V_m/I_{hc} igual o superior a 8, lo que provoca un error inferior a 0,5° en cada coeficiente. Suponiendo una I_{hc} de 1 nudo, la velocidad mínima debería ser de 8 nudos, y suponiendo una I_{hc} de 0,5 nudos, dicha velocidad debería ser de 4 nudos.
- iii) Los coeficientes B, C no se pueden calcular a partir de los pseudodesvíos, puesto que se puede cometer un error considerable.

Por tanto, no se puede efectuar una compensación completa haciendo uso únicamente del GPS. No obstante, si antes de determinar los pseudodesvíos, se anulan los desvíos a dos rumbos magnéticos cardinales separados 90° (para lo cual se requiere seguir dos enfilaciones próximas a sendos rumbos), resulta que:

$$\Delta e, w = A \pm B - E \Rightarrow B = \pm(\Delta e, w - A + E)$$

$$\Delta n, s = A \pm C + E \Rightarrow C = \pm(\Delta n, s - A - E)$$

donde $\Delta_{e,w}$ y $\Delta_{n,s}$ se pueden considerar los desvíos a las enfilaciones, los cuales se han anulado. Luego,

$$B = \pm(-A + E) \quad (+ \text{ enfilación próxima al E; } - \text{ enfilación próxima al W})$$

$$C = \pm(-A - E) \quad (+ \text{ enfilación próxima al N; } - \text{ enfilación próxima al S})$$

Simplificando,

$$B = (-1)^{[D_{m_1}/180 + 1]} \cdot (A - E) \quad C = (-1)^{[D_{m_2}/180 + 1,5]} \cdot (A + E)$$

donde $[n]$ indica la parte entera de n , y D_{m_1} , D_{m_2} , las demoras magnéticas, expresadas en forma circular (de 0° a 360°), de la enfilaciones próximas al E/Wm y al N/Sm respectivamente.

IV.1.4. Exposición del método

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, si se dispone tan solo de dos enfilaciones adecuadas, se puede realizar, de manera rigurosa, la compensación de una embarcación y la posterior confección de su tablilla de desvíos residuales, haciendo uso del GPS, como se detalla a continuación:

1.-Se sigue una enfilación coincidente o próxima al E/Wm, y se anula el desvío, haciendo que el rumbo de aguja corresponda al rumbo magnético de la enfilación. Luego, se continúa a esta enfilación, y se toma el rumbo efectivo indicado por el GPS ($S_{\text{ENFILACIÓN}}$), obteniendo el pseudodesvío al E/W: $\Psi_{e,w} = S_{\text{ENFILACIÓN}} - R^{\text{ENFILACIÓN}}$.

2.-*Idem* en una enfilación coincidente o próxima al N/Sm.

3.-Se arrumba a los otros seis rumbos de aguja principales, y se toma el rumbo efectivo indicado por el GPS a cada uno de ellos, obteniendo los pseudodesvíos.

4.-Se determinan los coeficientes A, D, E mediante las siguientes expresiones:

$$A = \frac{1}{4}(\Psi_n + \Psi_e + \Psi_s + \Psi_w) - dm, \text{ u otra de las dos expresiones indicadas}$$

$$D = \frac{1}{4}(\Psi_{ne} + \Psi_{sw} - \Psi_{se} - \Psi_{nw})$$

$$E = \frac{1}{4}(\Psi_n + \Psi_s - \Psi_e - \Psi_w)$$

5.-Con los valores obtenidos de A, E, se determinan los coeficientes B, C mediante las siguientes expresiones:

$$B = (-1)^{[D_{m_1}/180 + 1]} \cdot (A - E) \quad C = (-1)^{[D_{m_2}/180 + 1,5]} \cdot (A + E)$$

6.-Los compases instalados en la mayoría de embarcaciones menores, solo disponen de imanes correctores del desvío semicircular, pero no de correctores del desvío cuadrantal. Por tanto, con los coeficientes obtenidos, se confecciona directamente la tablilla de los desvíos residuales, aplicando la ecuación del desvío a diferentes rumbos de aguja, por ejemplo cada 15° , como es el caso de la tablilla del modelo español de Certificado de compensación de agujas náuticas (Figura 140).

7.-En el caso de poder compensar el desvío cuadrantal, una vez obtenido el valor del coeficiente D (punto 4), se sigue un rumbo de aguja cuadrantal, y se observa el rumbo efectivo que indica el GPS. Luego, se gobierna a dicho rumbo efectivo, y se altera D grados el rumbo de aguja, en el caso de seguir el NE o el SW, o $-D$ grados, si se sigue el SE o el NW. En principio, el coeficiente D se habría anulado; pero se puede dar un segundo borneo a los cuatro rumbos cuadrantales para tomar los nuevos pseudodesvíos, y determinar con ellos, el coeficiente D residual.

8.-Si una vez obtenida la tablilla de los desvíos residuales (punto 6), se observa que el desvío a un rumbo cardinal de los tomados en el punto 3, es demasiado grande, de manera que sea necesario anular la mitad de este desvío, entonces, se sigue el rumbo efectivo que se tomó a dicho rumbo cardinal (punto 3) y se anula la mitad del desvío.

Se entiende por desvío *demasiado grande* que sea mayor de 4° , ya que: al haber anulado el desvío al rumbo opuesto (punto 1 o 2), el coeficiente B o C sería mayor de 2° , siendo este un valor no admisible. También se debe anular la mitad de uno o de los dos desvíos a los rumbos cardinales tomados en el punto 3, si cualquiera de los desvíos obtenidos en la tablilla (punto 6) fuera mayor de 4° , ya que en tal caso, no se cumpliría con el apartado G1 de la Norma ISO 25862.

Una vez anulada la mitad de los desvíos citados, los coeficientes B, C, en principio, también se habrían anulado, a la vez que los coeficientes A, E deberían permanecer iguales; pero se puede dar un segundo borneo a los cuatro rumbos cardinales para tomar los nuevos pseudodesvíos, así como los desvíos a las enfilaciones, y obtener de nuevo los coeficientes A, E, B, C. En este caso, puesto que los desvíos a las enfilaciones no serán cero, los coeficientes B, C vienen dados por las siguientes expresiones:

$$B = \pm(\Delta e, w - A + E) \quad (+ \text{ enfilación próxima al E; } - \text{ enfilación próxima al W})$$

$$C = \pm(\Delta n, s - A - E) \quad (+ \text{ enfilación próxima al N; } - \text{ enfilación próxima al S})$$

9.-En cuanto a la obtención de las dos enfilaciones, en la sección 6 del artículo titulado: *Compass adjustment by GPS and two leading lines*, publicado por el autor y otros profesores en *Maritime Transport VIII* (disponible en UPCommons), se expone un caso concreto en el puerto de Barcelona.

IV.1.5. Verificación del método

INTRODUCCIÓN

Este método se verificó con unas pruebas realizadas en la bahía de Santoña (Cantabria) a bordo del buque ATO, una embarcación perteneciente a la Lista séptima, dedicada a la pesca deportiva y propiedad del señor Echevarría. Estas pruebas se efectuaron el día 24 de mayo de 2021, entre las 12:45 y las 13:45 de hora oficial. El viento fue del oeste con fuerza 5-6 en la escala de Beaufort, generando un oleaje de 1,5 m aproximadamente dentro de la bahía. El cielo estuvo cubierto unas 7 octas por estratocúmulos principalmente, pero también por nubes de mayor desarrollo vertical que provocaron lluvias intermitentes de moderada intensidad. Asimismo, el buque navegó a unos 7 nudos, que es una velocidad adecuada, de conformidad con los valores de la Tabla 8 y del punto ii) del epígrafe IV.1.3.



Figura 72. Buque ATO, visto desde su popa. Fuente: Propia. (izda.)

Figura 73. Buque ATO, visto desde su costado de estribor. Fuente: Propia. (dcha.)

Para la obtención de los desvíos, se empleó el compás magnético integral (CMI), explicado en el punto Tercero del epígrafe III.1.2. La entrada de rumbo verdadero al CMI se obtuvo del compás satelital del buque: un modelo JLR-21²⁰ del fabricante Japan Radio Company, Ltd. (JRC). En las Figuras 72 y 73, se aprecia la antena del compás satelital (con su base en forma de trébol). Asimismo, el compás magnético empleado también fue el propio del buque, del fabricante Geomar. La entrada de rumbo de aguja al CMI se llevó a cabo mediante un sensor magnético. En la Figura 74, se muestra el compás magnético y el sensor, en el momento de ajustar la indicación de este, y en la Figura 75, se observa el compás magnético con el sensor ya ajustado.

²⁰ http://www.jrc.co.jp/eng/product/lineup/jlr21_31/pdf/JLR-21.pdf



Figura 74. Compás magnético del buque ATO en el momento de ajustar el sensor del CMI. Fuente: Propia. (izda.)

Figura 75. Compás magnético del buque ATO con el sensor del CMI ajustado. Fuente: Propia. (dcha.)

En la Figura 76, se muestra el CMI (en modo *Compass*) instalado en un ordenador portátil, con las dos entradas de rumbo: el de aguja (C: compás) y el del compás satelital, el cual, al no haber girocompás, se introdujo en el lugar de este (G: girocompás). También se observa como el CMI proporciona la situación, y con ella, obtiene la declinación magnética (dm) del calculador de la NOAA (Figura 77). Con el rumbo verdadero dado por el compás satelital, el rumbo de aguja y la dm, se tiene el valor del desvío en todo momento: $\Delta = G - C - dm$



Figura 76. CMI (en modo *Compass*) con las indicaciones de: rumbo de aguja (C); rumbo verdadero (G), tomado del compás satelital; situación, y declinación magnética. Fuente: Propia.

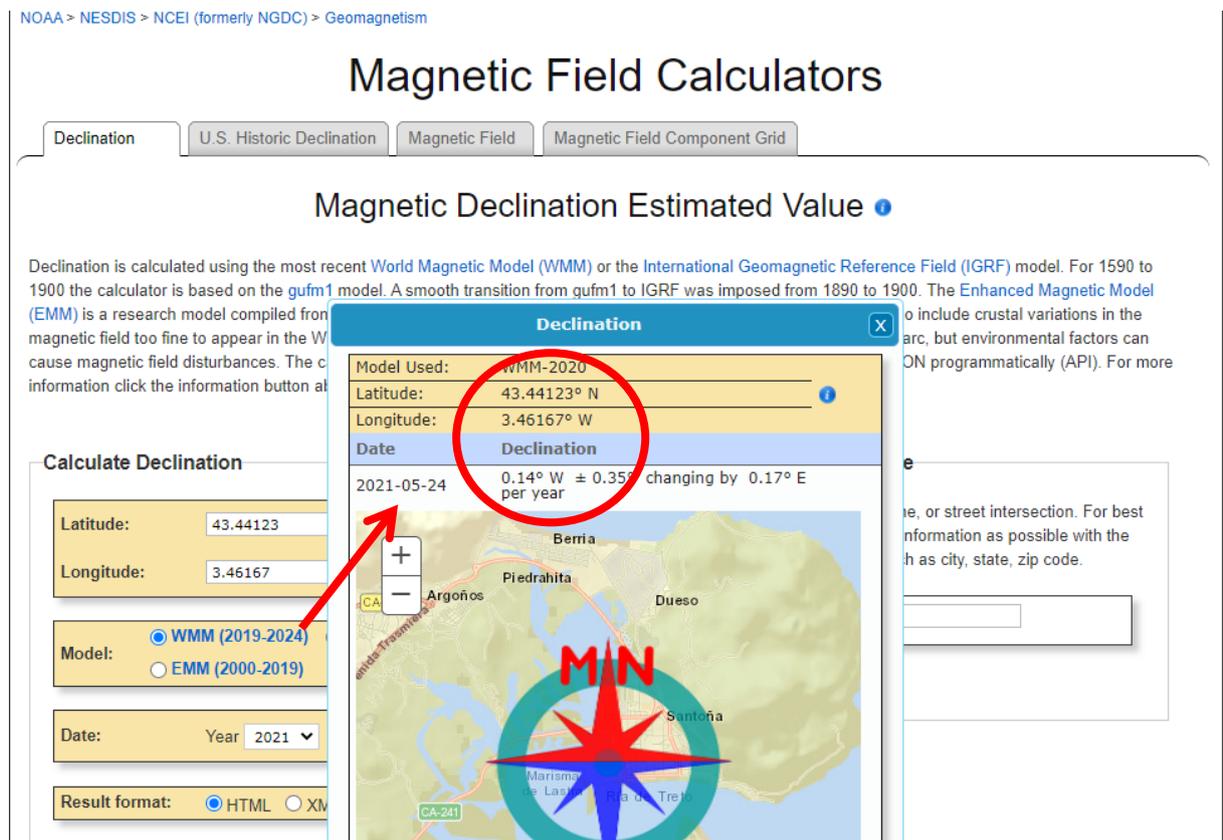


Figura 77: Calculador de la NOAA: declinación magnética para la situación y el día de las pruebas. Fuente: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml>

Se procedió a dar un borneo completo en la bahía, aunque sin la necesidad de seguir enfilaciones, puesto que los desvíos a los dos rumbos cardinales que se tomarían en las enfilaciones, se obtienen del CMI. La prueba consiste en verificar que: tomando los desvíos a dos rumbos cardinales separados 90° (habría cuatro casos: E–N, E–S, W–N, W–S) y los pseudodesvíos a los ocho rumbos principales, los coeficientes A,...,E calculados con los desvíos y los coeficientes A,...,E calculados mediante el método, son iguales o parecidos.



Figura 78. Bahía de Santoña. Fuente: Google Maps. (izda.)



Figura 79. Puerto de Santoña. Fuente: Google Maps. (dcha.)

Como se ha indicado, la obtención de los desvíos se efectuó automáticamente mediante el CMI. No obstante, hubo que determinar los pseudodesvíos a los ocho rumbos principales. Para ello, se utilizó el GPS del buque. Las Figuras 80 y 81 muestran el GPS y la salida del buque de su atraque. En la parte superior derecha de la Figura 81, se observa el GPS. Al mando de la embarcación, está su propietario y patrón, y a su derecha, el codirector de la tesis, el profesor Martínez-Lozares, quien realizó las conexiones de los equipos al CMI.



Figura 80. Navegador GPS del buque ATO. Fuente: Propia. (izda.)

Figura 81. Cabina del buque ATO. Fuente: Propia. (dcha.)

OBTENCIÓN DE LOS DESVÍOS Y CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES A PARTIR DE ELLOS

Tras el borneo, los desvíos obtenidos por el CMI fueron los siguientes:

	arithmetic	deviation
000°	-1.177°	-1.177°
015°	6.523°	-2.607°
030°	4.123°	-4.184°
045°	2.023°	-5.776°
060°	-4.077°	-7.168°
075°	-0.677°	-8.111°
090°	-8.377°	-8.377°
105°	-12.578°	-7.818°
120°	-6.478°	-6.411°
135°	-4.279°	-4.279°
150°	-3.179°	-1.671°
165°	1.021°	1.079°
180°	3.620°	3.620°
195°	4.620°	5.650°
210°	10.521°	6.970°
225°	14.721°	7.516°
240°	15.921°	7.356°
255°	11.324°	6.654°
270°	5.624°	5.624°
285°	2.524°	4.465°
300°	1.724°	3.316°
315°	15.123°	2.229°
330°	26.023°	1.175°
345°	14.823°	0.069°

Figura 82. Desvíos obtenidos por el CMI después de efectuar el borneo. Fuente: Propia.

La columna *arithmetic* corresponde a los desvíos obtenidos directamente por comparación de los rumbos verdadero y de aguja, teniendo en cuenta la declinación magnética. De estos desvíos, se obtienen los siguientes coeficientes:

$$A = \frac{1}{4}(\Delta n + \Delta e + \Delta s + \Delta w) = \frac{1}{4}(-1,177 - 8,377 + 3,620 + 5,624) = -0,0775$$

$$B = \frac{1}{2}(\Delta e - \Delta w) = \frac{1}{2}(-8,377 - 5,624) = -7,0005$$

$$C = \frac{1}{2}(\Delta n - \Delta s) = \frac{1}{2}(-1,177 - 3,620) = -2,3985$$

$$E = \frac{1}{4}(\Delta n - \Delta e + \Delta s - \Delta w) = \frac{1}{4}(-1,177 + 8,377 + 3,620 - 5,624) = 1,299$$

La columna *deviation* corresponde a los desvíos obtenidos mediante la fórmula práctica de la ecuación del desvío, considerando los coeficientes A, B, C, E obtenidos, y el D que resulta de seleccionar un desvío a un rumbo cuadrantal, que en este caso, es $\Delta se = -4,279$:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R'$$

$$D = (\Delta - A - B \cdot \sin R' - C \cdot \cos R' - E \cdot \cos 2R') / \sin 2R'$$

$$D = \left(-4,279 + 0,0775 + 7,0005 \cdot \sin 135 + 2,3985 \cdot \cos 135 - \underbrace{0}_{\cos 270=0} \right) / \left(\underbrace{-1}_{\sin 270=-1} \right) = 0,9474$$

Pero el coeficiente D medio, considerando los cuatro desvíos a los rumbos cuadrantales, es:

$$D = \frac{1}{4}(\Delta ne - \Delta se + \Delta sw - \Delta nw) = \frac{1}{4}(2,023 + 4,279 + 14,721 - 15,123) = 1,475$$

Por tanto, a efectos de comparar los coeficientes calculados con los desvíos y los coeficientes calculados con los pseudodesvíos, se considerará que los primeros son:

$$A = -0,0775 \quad B = -7,0005 \quad C = -2,3985 \quad D = 1,475 \quad E = 1,299$$

OBTENCIÓN DE LOS PSEUDODESVÍOS

El buque navegó a los siguientes rumbos verdaderos: N, NE, E, SE, S, SW, W, NW; y a cada uno de ellos, se observó el rumbo efectivo (COG) indicado por el GPS.

La lectura de los rumbos efectivos se realizó siguiendo la misma técnica que se emplea para tomar los calados cuando hay oleaje, o al observar el rumbo de aguja cuando se navega con el compás giroscópico. Es decir: observar las oscilaciones que tiene el dato (calado, rumbo de aguja o COG en este caso), desechar las oscilaciones extremas e irregulares, y apreciar una media, y asimismo, en el caso de los rumbos, ir observando también, en diferentes momentos, el valor de los datos a comparar (giroscópico y aguja, o verdadero y COG en este caso), a fin de verificar la media. Con el objetivo de facilitar la comparación de rumbos, el CMI se puso en modo *Gyrocompass* (rumbo verdadero obtenido el compás satelital).

Los rumbos efectivos obtenidos (al navegar a cada uno de los rumbos verdaderos indicados) fueron los siguientes:

000 046 091 136 179 226 269 315



Figura 83. Lectura de los rumbos efectivos, comparando el rumbo verdadero indicado por el CMI y el COG dado por el GPS. Fuente:Propia.



Figura 84. Lectura de los rumbos efectivos, comparando el rumbo verdadero indicado por el CMI y el COG dado por el GPS: detalle de la lectura del COG al rumbo verdadero N. Fuente:Propia.

OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES A PARTIR DE LOS DESVÍOS A DOS RUMBOS CARDINALES SEPARADOS 90° Y DE LOS PSEUDODESVÍOS

Aplicando la declinación magnética y los desvíos obtenidos por el CMI a los rumbos verdaderos, se obtienen los rumbos de aguja (R'), y con ellos, los pseudodesvíos: $\Psi = COG - R'$. En la Tabla 9, se determinan los pseudodesvíos.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Rv	000	045	090	135	180	225	270	315
-dm	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135
R	000,135	045,135	090,135	135,135	180,135	225,135	270,135	315,135
-Δ	1,177	-2,023	8,377	4,279	-3,620	-14,721	-5,624	-15,123
R'	001,312	043,112	098,512	139,414	176,515	210,414	264,511	300,012
COG	000	046	091	136	179	226	269	315
Ψ	-1,312	2,888	-7,512	-3,414	2,485	15,586	4,489	14,988

Tabla 9. Determinación de los pseudodesvíos con los datos obtenidos. Fuente: Propia.

Los coeficientes A, D, E obtenidos mediante los pseudodesvíos son:

$$A = \frac{1}{4}(\Psi_n + \Psi_e + \Psi_s + \Psi_w) = \frac{1}{4}(-1,312 - 7,512 + 2,485 + 4,489) = -0,4625$$

$$D = \frac{1}{4}(\Psi_{ne} - \Psi_{se} + \Psi_{sw} - \Psi_{nw}) = \frac{1}{4}(2,888 + 3,414 + 15,586 - 14,988) = 1,725$$

$$E = \frac{1}{4}(\Psi_n - \Psi_e + \Psi_s - \Psi_w) = \frac{1}{4}(-1,312 + 7,512 + 2,485 - 4,489) = 1,049$$

Los cuales son muy parecidos a los coeficientes obtenidos mediante los desvíos. En la Tabla 10, se muestran las diferencias en valor absoluto (Dif).

	A	D	E
Δ	-0,0775	1,475	1,299
Ψ	-0,4625	1,725	1,049
Dif	0,385	0,25	0,25

Tabla 10. Diferencias entre los coeficientes A, D, E obtenidos mediante los desvíos y mediante los pseudodesvíos. Fuente: Propia.

El coeficiente B se puede determinar a partir de los coeficientes A, D, E obtenidos mediante los pseudodesvíos y el desvío al E o al W.

Considerando el desvío al E, se tiene:

$$\Delta_e = A + B - E \Rightarrow B = \Delta_e - A + E = -8,377 + 0,4625 + 1,049 = -6,8655$$

Y considerando el desvío al W,

$$\Delta_w = A - B - E \Rightarrow B = -\Delta_w + A - E = -5,624 - 0,4625 - 1,049 = -7,1355$$

Asimismo, el coeficiente C se puede obtener de los coeficientes A, D, E obtenidos mediante los pseudodesvíos y el desvío al N o al S.

Considerando el desvío al N, resulta que:

$$\Delta_n = A + C + E \Rightarrow C = \Delta_n - A - E = -1,177 + 0,4625 - 1,049 = -1,7635$$

Y considerando el desvío al S,

$$\Delta_s = A - C + E \Rightarrow C = -\Delta_s + A + E = -3,620 - 0,4625 + 1,049 = -3,0335$$

En la Tabla 11, se muestran las diferencias en valor absoluto (Dif) entre los coeficientes B, C obtenidos mediante los desvíos (fila Δ) y los obtenidos mediante el método propuesto (fila Ψ). Para este segundo caso, se indica entre paréntesis, el rumbo cuyo desvío se ha empleado para calcular el coeficiente.

	B(E)	B(W)	C(N)	C(S)
Δ	-7,0005	-7,0005	-2,3985	-2,3985
Ψ	-6,8655	-7,1355	-1,7635	-3,0335
Dif	0,135	0,135	0,635	0,635

Tabla 11. Diferencias entre los coeficientes B, C obtenidos mediante los desvíos y mediante el método propuesto. Fuente: Propia.

Se observa que las diferencias para un mismo coeficiente son iguales. Esto indica que la media de los coeficientes obtenidos por el método propuesto, es el coeficiente obtenido mediante los desvíos, lo cual se desprende también de la teoría:

$$\frac{1}{2}[B(E)+B(W)]=\frac{1}{2}[(\Delta e-A+E)+(-\Delta w+A-E)]=\frac{1}{2}(\Delta e-\Delta w)=B$$

$$\frac{1}{2}[C(N)+C(S)]=\frac{1}{2}[(\Delta n-A-E)+(-\Delta s+A+E)]=\frac{1}{2}(\Delta n-\Delta s)=C$$

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

Las diferencias obtenidas para cada uno de los coeficientes, son las siguientes:

$$\text{Dif A} = 0,385 \quad \text{Dif B} = 0,135 \quad \text{Dif C} = 0,635 \quad \text{Dif D} = 0,25 \quad \text{Dif E} = 0,25$$

Solo en el caso del coeficiente C, la diferencia es superior a medio grado, y ninguna diferencia llega a 2/3 de grado.

Asimismo, redondeando los datos obtenidos a valores prácticos aproximados a medio grado, se tiene que: los coeficientes obtenidos mediante los desvíos son A = 0; B = -7; C = -2,5; D = 1,5; E = 1,5; y los coeficientes obtenidos mediante el método, A = -0,5; B(E) = -7; B(W) = -7; C(N) = -2; C(S) = -3; D = 1,5; E = 1. En este caso, los coeficientes B, D son iguales; mientras que los coeficientes A, C, E tienen una diferencia de medio grado.

A la vista de estos resultados, se puede afirmar que los coeficientes obtenidos mediante los desvíos y los obtenidos mediante el método propuesto, son muy parecidos, y por tanto, el método ha sido verificado con resultado satisfactorio.

IV.1.6. Conclusión

El método propuesto permite efectuar una compensación rigurosa y práctica en embarcaciones que solo disponen de indicador de rumbo magnético. No obstante, para minimizar los errores, se requiere una velocidad elevada. A modo orientación, para una corriente (*Drift*) de 1 nudo, la velocidad mínima debería ser de 8 nudos, y para una corriente (*Drift*) de 0,5 nudos, de 4 nudos.

IV.2. Métodos para compensar en función de las varillas d, b

IV.2.1. Estudio de las varillas d, b

DESVÍOS CAUSADOS POR LAS VARILLAS d, b (Gaztelu-Iturri, 1999, pp. 74–77)

En la Figura 85, se muestra la inducción de las varillas +d, +b, así como los desvíos que provocan. Los polos activos de las varillas se indican en negra.

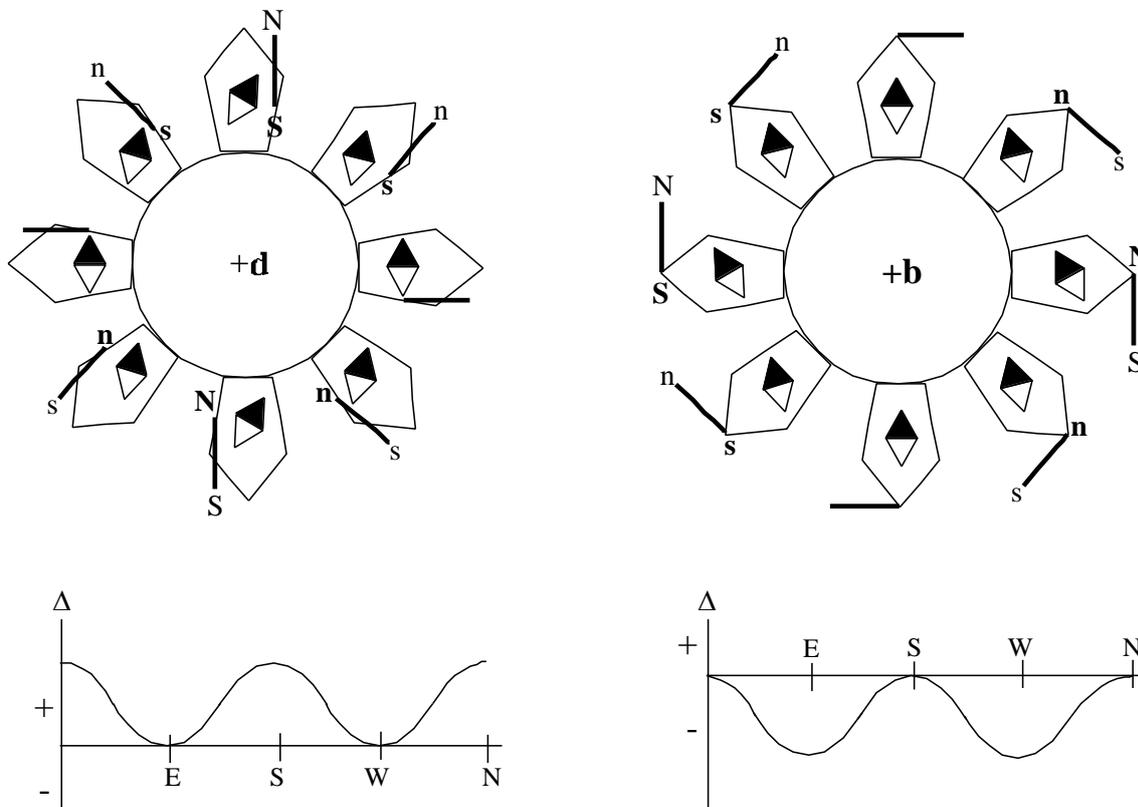


Figura 85. Desvíos causados por las varillas +d, +b. Fuente: Propia.

Se observa que los desvíos originados por una varilla +d son siempre positivos, y en consecuencia, los de una varilla -d, negativos. Asimismo, los desvíos de toda varilla d son máximos al N/Sm, y nulos al E/Wm. Por su parte, los desvíos que crea una varilla +b son siempre negativos, y por tanto, los de una -b, positivos. Además, los desvíos de toda varilla b son máximos al E/Wm, y nulos al N/Sm.

De la acción conjunta de las varillas d, b, se pueden dar tres casos:

i) Que sean iguales y del mismo signo. Por ejemplo: $b = d$, siendo ambas positivas.

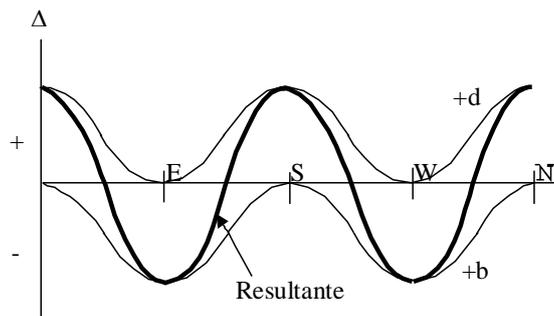


Figura 86. Efecto conjunto de una varilla +d y otra +b, tales que $b = d$. Fuente: Propia.

En este caso, la resultante es una curva de tipo cuadrantal, con su eje en la recta de $\Delta = 0$, lo cual refleja que estas varillas solo determinan el coeficiente E:

$$A = \frac{d - b}{2\lambda} \cdot \csc 1^\circ = \frac{d - d}{2\lambda} \cdot \csc 1^\circ = 0 \quad E = \frac{d + b}{2\lambda} \cdot \csc 1^\circ = \frac{d + d}{2\lambda} \cdot \csc 1^\circ = \frac{d}{\lambda} \cdot \csc 1^\circ$$

ii) Que sean iguales, pero de distinto signo. Por ejemplo: $b = -d$, siendo d positiva y b negativa.

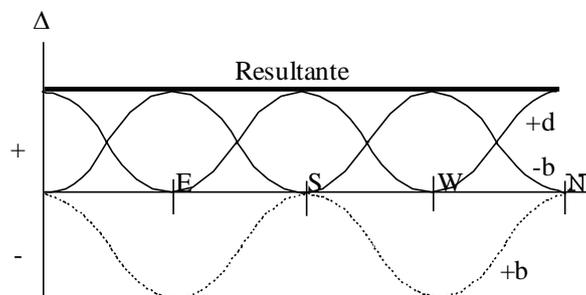


Figura 87. Efecto conjunto de una varilla +d y otra -b, tales que $b = -d$. Fuente: Propia.

Ahora, la resultante es una recta paralela al eje $\Delta = 0$, que indica que estas varillas solo determinan el coeficiente A:

$$A = \frac{d - b}{2\lambda} \cdot \csc 1^\circ = \frac{d + d}{2\lambda} \cdot \csc 1^\circ = \frac{d}{\lambda} \cdot \csc 1^\circ \quad E = \frac{d + b}{2\lambda} \cdot \csc 1^\circ = \frac{d - d}{2\lambda} \cdot \csc 1^\circ = 0$$

iii) Que tengan distinto valor. Por ejemplo: $d > b$, siendo ambas positivas.

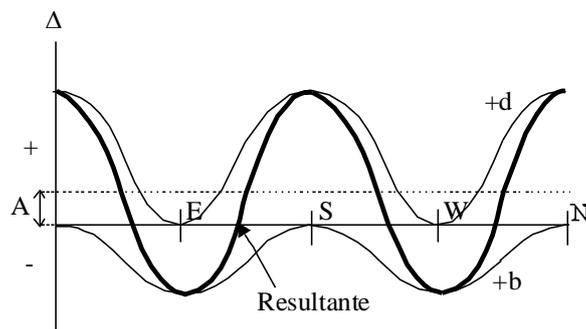


Figura 88. Efecto conjunto de una varilla +d y otra +b, tales que $d > b$. Fuente: Propia.

En este tercer caso, que es el genérico, se obtiene una curva de tipo cuadrantal, pero cuyo eje está desplazado el valor del coeficiente A.

INTENSIDAD DE LAS VARILLAS d, b

En la mayoría de buques, las varillas d, b tienen escaso valor. Por este motivo, normalmente no se giran las esferas para compensar el coeficiente E, ni tampoco la bitácora para corregir el coeficiente A (Gaztelu-Iturri, 1999, pp. 73, 78; Moréu, 1987, pp. 197, 206). En consecuencia, los coeficientes exactos α, ε no se alteran, a diferencia de los coeficientes β, γ, δ , que se reducen al efectuar la compensación. No obstante, las varillas d, b pueden ser considerables si se da alguno de los supuestos indicados en el epígrafe II.2.3.

IV.2.2. Compensación reducida

Como se ha indicado en la Parte III, la compensación reducida fue desarrollada en la tesis doctoral del profesor Gaztelu-Iturri, de la E.T.S. de Náutica y Máquinas Navales de Bilbao, y se considera como el punto de partida en lo referente al objetivo de esta tesis de reducir el número de rumbos a seguir durante el proceso de compensación.

Respecto a la compensación preliminar, consiste en anular solo tres desvíos, aproando únicamente a tres rumbos magnéticos: primero, se anulan con imanes los desvíos a dos rumbos cardinales separados 90° (por ejemplo E, N), y después, se anula con esferas el desvío a un rumbo cuadrantal (por ejemplo NE). Esto supone considerar la primera aproximación de la ecuación del desvío ($\Delta = B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R'$), obviando los coeficientes A, E, los cuales dependen de las varillas d, b. (Gaztelu-Iturri, 1999, pp. 73, 78–79)

Este método es más rápido que el convencional, ya que solo se anulan tres desvíos, y se obtienen los otros cinco para confeccionar la tablilla de los desvíos residuales, evitando así un segundo borneo para tomar los desvíos residuales. Sin embargo, tiene dos inconvenientes:

i) Los coeficientes B, C, D no quedan tan bien compensados como con el método convencional explicado en el epígrafe II.4.4. Pues cuando se anula un desvío cardinal con imanes, los coeficientes B, C no se anulan, sino que se alteran, apareciendo dos nuevos coeficientes B', C', y como consecuencia, el desvío a un rumbo cuadrantal también se ve afectado por ellos. Así por ejemplo, $\Delta_{ne} = A + B' \cdot 0,707 + C' \cdot 0,707 + D$. Por tanto, cuando se anula este desvío con esferas, tampoco se anula el coeficiente D, sino que se altera, resultando un D'.

ii) La fuerza directriz queda menos homogeneizada, puesto que: los desvíos máximos suelen ser más acusados que si se hubiera compensado con el método convencional, y los rumbos correspondientes a estos valores, más cercanos entre sí. Luego, tanto la mayor amplitud entre los desvíos máximos, como la mayor proximidad de los rumbos correspondientes, provocan que durante las caídas del buque, las aceleraciones angulares de la aguja sean más intensas, y por consiguiente, también lo sean las variaciones de la fuerza directriz.

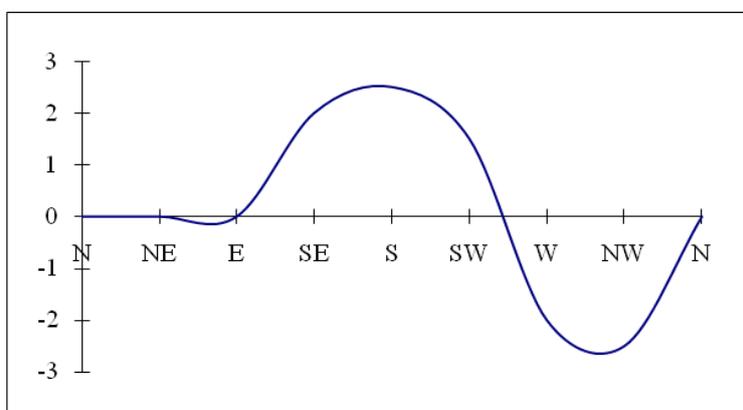


Figura 89. Ejemplo de curva de los desvíos residuales tras una compensación reducida. Fuente: Propia.

No obstante, estos inconvenientes apenas son apreciables si las varillas d , b son pequeñas (Gaztelu-Iturri, 1999, pp. 73, 78; Moréu, 1987, pp. 197, 206).

En cualquier caso, si se aplica la compensación reducida a un buque simétrico, pero que por una circunstancia anormal, las varillas d , b son apreciables (hecho que *a priori* se desconoce), resulta que: al tomar los desvíos residuales, aparece un desvío demasiado grande a un rumbo cardinal al que no se anuló el desvío durante la compensación, entendiéndose por *demasiado grande*, mayor que 4, lo que implica que el coeficiente B o C es mayor que 2. Entonces, hay que anular la mitad del desvío excesivo, y tomar de nuevo todos los desvíos residuales. También podría darse el caso de tener que volver a ajustar las esferas si se obtuviera un D mayor que 2.

A continuación, se plantean dos casos de compensación reducida.

Ejercicio 44 (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 102): En una bitácora, hay instalados los siguientes correctores: una pareja de ILs en la casilla 12, rojos a popa; un IT en la 8, rojo a estribor; esferas de babor a estribor, a la mitad de su recorrido, y el corrector de escora, consistente en un solo imán, con el rojo hacia arriba y también a medio recorrido. Proa al Nm, se obtiene $\Delta n = +4$. Después de anularlo, se escora el buque 10° a babor, obteniendo $\Delta n = -3$. Adrizado de nuevo, resulta: $\Delta e = +3$, $\Delta se = +4$. Todos estos desvíos se anulan. Explicar cómo se ha efectuado la compensación; es decir: subir o bajar los imanes, y acercar o alejar las esferas.

Solución:

$\Delta n = C \rightarrow C = +4 \rightarrow$ rojo a estribor; pero el IT ya tiene el rojo a estribor \rightarrow subir el IT

$J = \Delta e/i \cdot \sec R'$ (Δe : desvío de escora; no confundirlo con el desvío al E)

$\Delta e = \Delta i - \Delta = -3 - 0 = -3$; i : babor (-); $\sec R' = \sec 0 = 1$ (+) $\rightarrow J$ (+) = (- / - · +) \rightarrow rojo abajo; pero el Iv tiene el rojo hacia arriba \rightarrow bajar el Iv

$\Delta e = B \rightarrow B = +3 \rightarrow$ rojos a proa; pero los ILs tiene los rojos a popa \rightarrow bajar los ILs

$\Delta se = -D \rightarrow D = -4 \rightarrow$ la varilla residual tras instalar las esferas es una +e \rightarrow alejar las esferas

Ejercicio 45 (propio): En una bitácora, hay instalados los siguientes correctores: una pareja de ILs en la casilla 10, rojos a proa; un IT en la 6, rojo a estribor; esferas de babor a estribor, a medio recorrido, y el corrector se escora con el rojo arriba, también a la mitad de su recorrido. A los rumbos magnéticos S, W y SW (en este orden), se obtienen los siguientes rumbos de aguja: 183, 266 y 223 respectivamente. Se anulan los tres desvíos a medida que aparecen, y a continuación, se completa el borneo a los cinco rumbos principales restantes, obteniendo los siguientes rumbos de aguja: 137, 092, 046, 358 y 314. Finalmente, al Nm, se escora el buque 10° a estribor, obteniendo el rumbo de aguja N. Se pide:

- i) Explicar cómo se ha efectuado la compensación: subir o bajar los imanes, y acercar o alejar las esferas.
- ii) Cumplimentar la tablilla de los desvíos residuales del modelo oficial (Figura 140), donde se anotan los desvíos a los rumbos de aguja separados 15° entre sí (N, 015, 030,...). Considerar para su obtención los ocho coeficientes A,...,K, y utilizar la hoja de cálculo propuesta en el Ejercicio 8.
- iii) Trazar la curva de los desvíos residuales, y comentarla.

Solución:

i) $\Delta_s = 180 - 183 = -3$ $\Delta_w = 270 - 266 = +4$ $\Delta_{sw} = 225 - 223 = +2$

$\Delta_s = -C \rightarrow C = +3 \rightarrow$ rojo a estribor; pero el IT ya tiene el rojo a estribor \rightarrow subir el IT

$\Delta_w = -B \rightarrow B = -4 \rightarrow$ rojos a popa; pero los ILs tiene los rojos a proa \rightarrow bajar los ILs

$\Delta_{sw} = D \rightarrow D = +2 \rightarrow$ la varilla residual tras instalar las esferas es una -e \rightarrow acercar las esferas

Δ de escora: $\Delta_n = 360 - 358 = +2$ $\Delta_i(n) = 0$ $\Delta_e = \Delta_i - \Delta = 0 - 2 = -2$

$J = \Delta_e / i \cdot \sec R' = -2 / 10 \cdot 1 (-) \rightarrow$ rojo arriba; pero el Iv ya tiene el rojo arriba \rightarrow subir el Iv

ii) Los desvíos a los rumbos S, W, SW se han anulado durante la compensación. Asimismo, se ha obtenido $\Delta_n = +2$. Los demás desvíos son:

$\Delta_{se} = 135 - 137 = -2$ $\Delta_e = 090 - 092 = -2$ $\Delta_{ne} = 045 - 046 = -1$ $\Delta_{nw} = 315 - 314 = +1$

Con la hoja de cálculo, se tiene:

	A	B	C	D	E	E	G	H
1	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
2	2	-1	-2	-2	0	0	0	1
3								
4	A	B	C	D	E	F	G	K
5	-0,25	-1,21	0,85	0	1	-0,21	0,15	0,25
6								
7	R'	Δ	R'	Δ	R'	Δ	R'	Δ
8	0	2	90	-2	180	0	270	0
9	15	1,2	105	-2,1	195	0,3	285	0,1
10	30	0	120	-2,2	210	0,2	300	0,4
11	45	-1	135	-2	225	0	315	1
12	60	-1,6	150	-1,4	240	-0,1	330	1,7
13	75	-1,9	165	-0,6	255	-0,1	345	2,1

Tabla 12. Hoja de cálculo (resolución del Ejercicio 45). Fuente: Propia.

Se observa que ninguno de los coeficiente A,...,E es mayor que 2, y ninguno de los F,...,K, mayor que 0,5. Asimismo, ningún desvío es superior a 3 (en valor absoluto). Por tanto, la compensación es correcta.

iii) En el Ejercicio 9, se insertó la curva de los desvíos residuales en la hoja de cálculo. En este caso, se obtiene la siguiente curva, que es de tipo semicircular (con dos desvíos máximos), y con una anomalía entre los rumbos S y W, debido a la forma como se ha compensado.

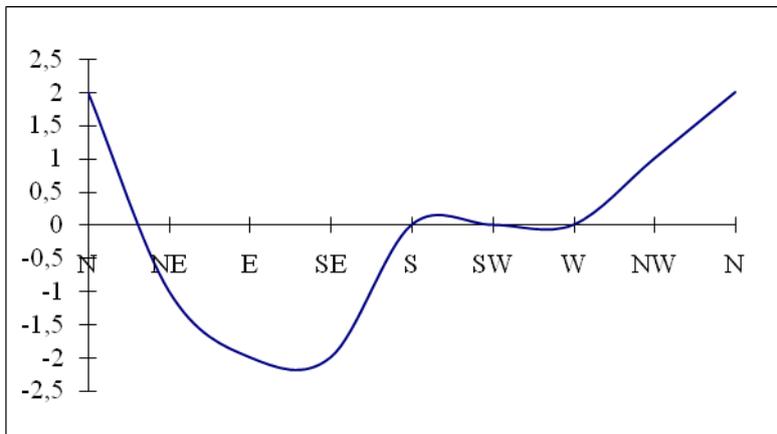


Figura 90. Curva de los desvíos residuales (resolución del Ejercicio 45). Fuente: Propia.

IV.2.3. Compensación con varillas d, b considerables

Cuando se han tomado los desvíos, siempre se considera que:

$$\beta = \sin B = B \cdot \sin 1^\circ \Rightarrow \beta \cdot \csc 1^\circ = B = \frac{1}{2}(\Delta e - \Delta w)$$

$$\gamma = \sin C = C \cdot \sin 1^\circ \Rightarrow \gamma \cdot \csc 1^\circ = C = \frac{1}{2}(\Delta n - \Delta s)$$

No obstante, esto es según la fórmula práctica de la ecuación aproximada del desvío. Si se considera la segunda aproximación, se tiene:

$$\beta = \sin B + \sin F = (B + F) \cdot \sin 1^\circ \Rightarrow \beta \cdot \csc 1^\circ = B + F$$

$$\gamma = \sin C - \sin G = (C - G) \cdot \sin 1^\circ \Rightarrow \gamma \cdot \csc 1^\circ = C - G$$

Por consiguiente, no se trata de anular los coeficientes aproximados B, C, sino los exactos β, γ ; es decir: al Ea o al Wa, hay que mover B + F grados el rumbo de aguja, y al N/Sa, hay que moverlo C - G grados.

Además, cuando los coeficientes α, ε son grandes, no es aplicable la segunda aproximación, sino que se debe considerar la serie de Fourier hasta el coeficiente K, con lo cual, el objetivo de este epígrafe es hallar la relación entre los coeficientes aproximados A, ..., K y los exactos $\alpha, \dots, \varepsilon$, a fin de conocer el desvío que hay que anular a los distintos rumbos de aguja cuando las varillas d, b son considerables.

La ecuación exacta del desvío es:

$$\sin \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin(2R' + \Delta) + \varepsilon \cdot \cos(2R' + \Delta)$$

Desarrollada,

$$\begin{aligned} \sin \Delta = & \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' \cdot \cos \Delta + \\ & + \delta \cdot \cos 2R' \cdot \sin \Delta + \varepsilon \cdot \cos 2R' \cdot \cos \Delta - \varepsilon \cdot \sin 2R' \cdot \sin \Delta \end{aligned}$$

En la segunda aproximación, se sustituyó: $\cos \Delta$ por 1; $\sin \Delta$ en el segundo miembro por su valor según la primera aproximación, y se obvió el término $\varepsilon \cdot \sin 2R' \cdot \sin \Delta$. Ahora, también se considerará $\cos \Delta = 1$, pero $\sin \Delta$ en el segundo miembro se sustituirá por su valor según la fórmula práctica, y se considerarán todos los términos. Así pues,

$$\begin{aligned} \sin \Delta = \Delta \cdot \sin 1^\circ = & \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \\ & + \delta \cdot \cos 2R' (\alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \varepsilon \cdot \cos 2R') + \varepsilon \cdot \cos 2R' - \\ & - \varepsilon \cdot \sin 2R' (\alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \varepsilon \cdot \cos 2R') \end{aligned}$$

Operando,

$$\begin{aligned} \Delta \cdot \sin 1^\circ = & \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \delta \cdot \alpha \cdot \cos 2R' + \delta \cdot \beta \cdot \cos 2R' \cdot \sin R' + \\ & + \delta \cdot \gamma \cdot \cos 2R' \cdot \cos R' + \delta^2 \cdot \cos 2R' \cdot \sin 2R' + \delta \cdot \varepsilon \cdot \cos^2 2R' + \varepsilon \cdot \cos 2R' - \varepsilon \cdot \alpha \cdot \sin 2R' - \\ & - \varepsilon \cdot \beta \cdot \sin 2R' \cdot \sin R' - \varepsilon \cdot \gamma \cdot \sin 2R' \cdot \cos R' - \varepsilon \cdot \delta \cdot \sin^2 2R' - \varepsilon^2 \cdot \sin 2R' \cdot \cos 2R' \\ \Delta \cdot \sin 1^\circ = & \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + (\delta - \varepsilon \cdot \alpha) \cdot \sin 2R' + (\varepsilon + \delta \cdot \alpha) \cdot \cos 2R' + \\ & + (\delta^2 - \varepsilon^2) \cdot \sin 2R' \cdot \cos 2R' + \delta \cdot \varepsilon \cdot (\cos^2 2R' - \sin^2 2R') + \delta \cdot \beta \cdot \cos 2R' \cdot \sin R' + \\ & + \delta \cdot \gamma \cdot \cos 2R' \cdot \cos R' - \varepsilon \cdot \beta \cdot \sin 2R' \cdot \sin R' - \varepsilon \cdot \gamma \cdot \sin 2R' \cdot \cos R' \end{aligned}$$

Ahora bien:

$$\begin{aligned} \cos 2R' \cdot \sin R' = \frac{1}{2} (\sin 3R' - \sin R') \quad \sin 2R' \cdot \sin R' = \frac{1}{2} (\cos R' - \cos 3R') \\ \cos 2R' \cdot \cos R' = \frac{1}{2} (\cos 3R' + \cos R') \quad \sin 2R' \cdot \cos R' = \frac{1}{2} (\sin 3R' + \sin R') \end{aligned}$$

Estas expresiones se deducen de las siguientes:

$$\begin{aligned} \sin 3R' = \sin(2R' + R') = \sin 2R' \cdot \cos R' + \cos 2R' \cdot \sin R' \\ \sin R' = \sin(2R' - R') = \sin 2R' \cdot \cos R' - \cos 2R' \cdot \sin R' \\ \cos 3R' = \cos(2R' + R') = \cos 2R' \cdot \cos R' - \sin 2R' \cdot \sin R' \\ \cos R' = \cos(2R' - R') = \cos 2R' \cdot \cos R' + \sin 2R' \cdot \sin R' \end{aligned}$$

En consecuencia,

$$\begin{aligned} \Delta \cdot \sin 1^\circ = & \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + (\delta - \varepsilon \cdot \alpha) \cdot \sin 2R' + (\varepsilon + \delta \cdot \alpha) \cdot \cos 2R' + \frac{1}{2} (\delta^2 - \varepsilon^2) \cdot \sin 4R' + \\ & + \delta \cdot \varepsilon \cdot \cos 4R' + \delta \cdot \beta \cdot \frac{1}{2} (\sin 3R' - \sin R') + \delta \cdot \gamma \cdot \frac{1}{2} (\cos 3R' + \cos R') - \varepsilon \cdot \beta \cdot \frac{1}{2} (\cos R' - \cos 3R') - \\ & - \varepsilon \cdot \gamma \cdot \frac{1}{2} (\sin 3R' + \sin R') \\ \Delta \cdot \sin 1^\circ = & \alpha + \left[\beta - \frac{1}{2} (\delta \cdot \beta + \varepsilon \cdot \gamma) \right] \cdot \sin R' + \left[\gamma + \frac{1}{2} (\delta \cdot \gamma - \varepsilon \cdot \beta) \right] \cdot \cos R' + (\delta - \varepsilon \cdot \alpha) \cdot \sin 2R' + \\ & + (\varepsilon + \delta \cdot \alpha) \cdot \cos 2R' + \frac{1}{2} (\delta \cdot \beta - \varepsilon \cdot \gamma) \cdot \sin 3R' + \frac{1}{2} (\delta \cdot \gamma + \varepsilon \cdot \beta) \cdot \cos 3R' + \frac{1}{2} (\delta^2 - \varepsilon^2) \cdot \sin 4R' + \\ & + \delta \cdot \varepsilon \cdot \cos 4R' \end{aligned}$$

Por consiguiente,

$$\begin{aligned}
 A &= \alpha \cdot \operatorname{csc} 1^\circ & B &= \left[\beta - \frac{1}{2}(\delta \cdot \beta + \varepsilon \cdot \gamma) \right] \cdot \operatorname{csc} 1^\circ & G &= \frac{1}{2}(\delta \cdot \gamma + \varepsilon \cdot \beta) \cdot \operatorname{csc} 1^\circ \\
 D &= (\delta - \varepsilon \cdot \alpha) \cdot \operatorname{csc} 1^\circ & C &= \left[\gamma + \frac{1}{2}(\delta \cdot \gamma - \varepsilon \cdot \beta) \right] \cdot \operatorname{csc} 1^\circ & H &= \frac{1}{2}(\delta^2 - \varepsilon^2) \cdot \operatorname{csc} 1^\circ \\
 E &= (\varepsilon + \delta \cdot \alpha) \cdot \operatorname{csc} 1^\circ & F &= \frac{1}{2}(\delta \cdot \beta - \varepsilon \cdot \gamma) \cdot \operatorname{csc} 1^\circ & K &= \delta \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{csc} 1^\circ
 \end{aligned}$$

Luego, de las expresiones de A, D, E, resulta que:

$$\begin{aligned}
 \alpha &= A \cdot \sin 1^\circ = \sin A \\
 \delta - \varepsilon \cdot \alpha &= D \cdot \sin 1^\circ = \sin D \quad (\text{i}) \\
 \varepsilon + \delta \cdot \alpha &= E \cdot \sin 1^\circ = \sin E \quad (\text{ii}) \\
 \alpha \cdot (\text{i}) &\Rightarrow \delta \cdot \alpha - \varepsilon \cdot \alpha^2 = \alpha \cdot \sin D \quad (\text{iii}) \\
 \alpha \cdot (\text{ii}) &\Rightarrow \varepsilon \cdot \alpha + \delta \cdot \alpha^2 = \alpha \cdot \sin E \quad (\text{iv}) \\
 (\text{i}) + (\text{iv}) &\Rightarrow \delta + \delta \cdot \alpha^2 = \sin D + \alpha \cdot \sin E \Rightarrow \delta \cdot (1 + \sin^2 A) \approx \delta = \sin D + \sin A \cdot \sin E \\
 (\text{ii}) - (\text{iii}) &\Rightarrow \varepsilon + \varepsilon \cdot \alpha^2 = \sin E - \alpha \cdot \sin D \Rightarrow \varepsilon \cdot (1 + \sin^2 A) \approx \varepsilon = \sin E - \sin A \cdot \sin D
 \end{aligned}$$

Además, de las expresiones de B, C, F, G, se tiene:

$$\begin{aligned}
 B - F &= (\beta - \delta \cdot \beta) \cdot \operatorname{csc} 1^\circ = \beta \cdot (1 - \delta) \cdot \operatorname{csc} 1^\circ \Rightarrow \beta = \frac{B - F}{1 - \delta} \cdot \sin 1^\circ \\
 \beta &= \frac{B - F}{1 - (\sin D + \sin E \cdot \sin A)} \cdot \sin 1^\circ = \frac{B - F}{1 - D \cdot \sin 1^\circ - E \cdot A \cdot \sin^2 1^\circ} \cdot \sin 1^\circ \approx \frac{B - F}{1 - D \cdot \sin 1^\circ} \cdot \sin 1^\circ \\
 C + G &= (\gamma + \delta \cdot \gamma) \cdot \operatorname{csc} 1^\circ = \gamma \cdot (1 + \delta) \cdot \operatorname{csc} 1^\circ \Rightarrow \gamma = \frac{C + G}{1 + \delta} \cdot \sin 1^\circ \approx \frac{C + G}{1 + D \cdot \sin 1^\circ} \cdot \sin 1^\circ
 \end{aligned}$$

Pero si previamente se anula el coeficiente D, resulta que:

$$\beta = (B - F) \cdot \sin 1^\circ \quad \gamma = (C + G) \cdot \sin 1^\circ$$

Luego, para anular los coeficientes β , γ , hay que corregir los siguientes desvíos:

$$\begin{aligned}
 B - F &= \frac{1}{4} \left[\Delta e - \Delta w + (\Delta n e + \Delta s e - \Delta s w - \Delta n w) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \right] - \frac{1}{4} \left[\Delta w - \Delta e + (\Delta n e + \Delta s e - \Delta s w - \Delta n w) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \right] \\
 B - F &= \frac{1}{2} (\Delta e - \Delta w) \\
 C + G &= \frac{1}{4} \left[\Delta n - \Delta s + (\Delta n e + \Delta n w - \Delta s e - \Delta n w) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \right] + \frac{1}{4} \left[\Delta n - \Delta s - (\Delta n e + \Delta n w - \Delta s e - \Delta n w) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \right] \\
 C + G &= \frac{1}{2} (\Delta n - \Delta s)
 \end{aligned}$$

O sea: los mismos desvíos que en los casos habituales. Y también se puede proceder anulando todo el desvío a dos rumbos cardinales separados 90° (por ejemplo N, E) y la mitad a sus opuestos. Pues:

$$\begin{aligned}
 \left. \begin{aligned} \Delta e = 0 &= A + B' - E - F' + K \\ \Delta w = 0 &= A - B' - E + F' + K \end{aligned} \right\} \Rightarrow -\Delta w = 2B' - 2F' \Rightarrow B' - F' = -\frac{1}{2} \Delta w \\
 \left. \begin{aligned} \Delta n = 0 &= A + C' + E + G' + K \\ \Delta s = 0 &= A - C' + E - G' + K \end{aligned} \right\} \Rightarrow -\Delta s = 2C' + 2G' \Rightarrow C' + G' = -\frac{1}{2} \Delta s
 \end{aligned}$$

CONCLUSIÓN

Aunque las varillas d , b sean considerables, la compensación se puede llevar a cabo de la forma habitual, pero teniendo la precaución de anular el coeficiente D antes de corregir el desvío semicircular, lo cual también es necesario para contrarrestar la inducción de los imanes sobre las esferas, como se indicó en el capítulo II.7.

IV.2.4. Compensación con varillas d , b nulas o pequeñas: reducción de todo el proceso a un solo borneo de cinco rumbos

EXPOSICIÓN DEL MÉTODO PARA REDUCIR TODO EL PROCESO DE LA COMPENSACIÓN A UN SOLO BORNEO DE CINCO RUMBOS

En el epígrafe anterior, se ha visto que: tanto si las varillas d , b son pequeñas, como si son grandes, la compensación se puede efectuar del mismo modo. En consecuencia, si las esferas están colocadas, el coeficiente D ya está anulado (o queda un D residual), y por tanto, se puede empezar la compensación aproando a los cuatro rumbos cardinales.

Suponiendo que el orden sea E, N, W, S, cuando se han anulado los desvíos al E y al N, cabe esperar que los desvíos al W y al S sean pequeños, de forma que ninguno de los coeficientes residuales A , B , C , E sea mayor que 2. En tal caso, no es necesario anular la mitad de los desvíos al W y al S, de modo que tampoco se alteran los desvíos residuales al E y al N, a la vez que estos resultados indican que las varillas d , b son nulas o pequeñas, y en consecuencia, los coeficientes F , G , H , K se pueden obviar.

A menos que se trate de la primera compensación, lo normal es no tener que tocar las esferas. No obstante, hay que determinar el coeficiente D , y si fuera mayor que 2, ajustar la posición de las esferas para anularlo. Entonces:

Sea R' el rumbo de aguja que se lee al seguir el rumbo magnético R , y R_c el rumbo magnético *corregido*; es decir: el rumbo de aguja que se leería si $D = 0$, o lo que es lo mismo, el rumbo de aguja al que se debe dejar el compás para anular el coeficiente D . De acuerdo con esto,

$$\Delta = R - R' = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R'$$

$$\text{Si } D = 0, \Delta' = R - R_c = A + B \cdot \sin R_c + C \cdot \cos R_c + E \cdot \cos 2R_c$$

Sustituyendo R' , R_c por R en la fórmula de los desvíos, se tiene:

$$R - R' = A + B \cdot \sin R + C \cdot \cos R + D \cdot \sin 2R + E \cdot \cos 2R$$

$$R - R_c = A + B \cdot \sin R + C \cdot \cos R + E \cdot \cos 2R$$

Y restando,

$$(R - R') - (R - R_c) = R_c - R' = D \cdot \sin 2R \Rightarrow D = (R_c - R') \cdot \csc 2R$$

A los rumbos cuadrantales, $\csc 2R = \pm 1$, y a los rumbos próximos a ellos, también se puede sustituir $\csc 2R$ por ± 1 .

Así pues, en los cuadrantes impares (I y III), $D = R_c - R'$, y en los cuadrantes pares (II y IV), $D = R' - R_c$; o de forma genérica,

$$D = (R_c - R') \cdot (-1)^{[R/90]}$$

donde $[n]$ la parte entera de n , y R_c se calcula a partir de su definición:

$$R - R_c = A + B \cdot \sin R + C \cdot \cos R + E \cdot \cos 2R \approx A + B \cdot \sin R + C \cdot \cos R$$

$$R_c = R - A - B \cdot \sin R - C \cdot \cos R$$

En resumen: para determinar el coeficiente D , hay que aproar a un rumbo cuadrantal (o a uno próximo), y determinar el R_c correspondiente, mediante los coeficientes residuales obtenidos a los rumbos cardinales. Luego, $D = R_c - R'$ en los cuadrantes impares, y $D = R' - R_c$ en los pares. Finalmente, si $D > 2$, se anula este coeficiente, ajustando la posición de las esferas para que $R' = R_c$.

Por último, una vez terminada la compensación, se confecciona la tablilla de los desvíos residuales con una hoja de cálculo, considerando la fórmula práctica de la ecuación del desvío.

NOTA: Cuando se anulan los desvíos a los rumbos cardinales, es conveniente anotar los desvíos iniciales, así como la posición inicial de los imanes, ya que se podría dar el caso de que la situación final fuera peor que la inicial. Por ejemplo: inicialmente, se obtiene $\Delta_n = +2$, y se anula, observando luego $\Delta_s = -4$; pero dejando los IT como estaban al principio, resulta que $\Delta_s = -2$. En este caso, es mejor dejar los desvíos iniciales de 2° , en lugar de uno de 0° y otro de 4° , puesto que la fuerza directriz queda más homogeneizada.

ANÁLISIS Y JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO

La ecuación exacta del desvío es:

$$\begin{aligned} \sin \Delta = & \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' \cdot \cos \Delta + \\ & + \delta \cdot \cos 2R' \cdot \sin \Delta + \varepsilon \cdot \cos 2R' \cdot \cos \Delta - \varepsilon \cdot \sin 2R' \cdot \sin \Delta \end{aligned}$$

Considerando $\sin \Delta = \Delta \cdot \sin 1^\circ$, $\cos \Delta = 1$, se tiene:

$$\Delta \cdot \sin 1^\circ = \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \delta \cdot \Delta \cdot \sin 1^\circ \cdot \cos 2R' + \varepsilon \cdot \cos 2R' - \varepsilon \cdot \Delta \cdot \sin 1^\circ \cdot \sin 2R'$$

Y obviando los términos $\delta \cdot \Delta \cdot \sin 1^\circ$, $\varepsilon \cdot \Delta \cdot \sin 1^\circ$, resulta que:

$$\Delta \cdot \sin 1^\circ = \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \varepsilon \cdot \cos 2R'$$

Pero esta igualdad es la fórmula práctica de la ecuación del desvío, puesto que los coeficientes exactos son los senos de los aproximados de la fórmula práctica.

Al no considerar $\delta \cdot \Delta \cdot \sin 1^\circ$, $\varepsilon \cdot \Delta \cdot \sin 1^\circ$, se ha supuesto que:

$$\delta \cdot \Delta \cdot \sin 1^\circ = D \cdot \sin 1^\circ \cdot \Delta \cdot \sin 1^\circ = D \cdot \Delta \cdot \sin^2 1^\circ = 0 \quad \varepsilon \cdot \Delta \cdot \sin 1^\circ = E \cdot \Delta \cdot \sin^2 1^\circ = 0$$

Luego, las simplificaciones que permiten pasar de la ecuación exacta a la fórmula práctica son:

$$\sin \Delta = \Delta \cdot \sin 1^\circ \quad \cos \Delta = 1 \quad D \cdot \Delta \cdot \sin^2 1^\circ = 0 \quad E \cdot \Delta \cdot \sin^2 1^\circ = 0$$

Después de la compensación, para que los coeficientes residuales B, C no sean mayores que 2, el máximo valor admisible para el desvío a un rumbo cardinal es de 4° (suponiendo que se ha anulado su opuesto). Asimismo, si ningún coeficiente es mayor que 2, el valor máximo que puede tener el desvío a un rumbo de aguja cuadrantal cuadrantal (por ejemplo al NE) es:

$$\Delta_{ne} = A + B \cdot 0,707 + C \cdot 0,707 + D = 2 + 2 \cdot 0,707 + 2 \cdot 0,707 + 2 = 6,828 \cong 7$$

Por consiguiente, el máximo desvío que puede haber es de 7°, de forma que el máximo error cometido en cada una de las simplificaciones es:

i) Al sustituir $\sin \Delta$ por $\Delta \cdot \sin 1^\circ$, no se comete ningún error, ya que $\sin 7^\circ = 0,122$ y $7 \cdot \sin 1^\circ = 7/57,3 = 0,122$.

ii) Al sustituir $\cos \Delta$ por 1, el error máximo es:

$$\left| \frac{\cos 7^\circ - 1}{\cos 7^\circ} \right| \cdot 100 = \left| \frac{0,993 - 1}{0,993} \right| \cdot 100 = 0,7 \%$$

iii) El valor máximo de $D \cdot \Delta \cdot \sin^2 1^\circ$, $E \cdot \Delta \cdot \sin^2 1^\circ$ es $2 \cdot 7/57,3^2 = 0,0043$

Estas cifras son insignificantes, y prueban que: si ninguno de los coeficientes A,...,E es mayor que 2, las simplificaciones hechas para pasar de la ecuación exacta a la fórmula práctica no introducen errores. Este resultado ya es suficiente para justificar el método. No obstante, a continuación, se analizará el valor de los nueve coeficientes A,...,K para justificar que los F,...,K se pueden obviar si los cinco coeficientes exactos son pequeños:

$$\begin{aligned} A &= \alpha \cdot \csc 1^\circ & B &= \left[\beta - \frac{1}{2}(\delta \cdot \beta + \varepsilon \cdot \gamma) \right] \cdot \csc 1^\circ & G &= \frac{1}{2}(\delta \cdot \gamma + \varepsilon \cdot \beta) \cdot \csc 1^\circ \\ D &= (\delta - \varepsilon \cdot \alpha) \cdot \csc 1^\circ & C &= \left[\gamma + \frac{1}{2}(\delta \cdot \gamma - \varepsilon \cdot \beta) \right] \cdot \csc 1^\circ & H &= \frac{1}{2}(\delta^2 - \varepsilon^2) \cdot \csc 1^\circ \\ E &= (\varepsilon + \delta \cdot \alpha) \cdot \csc 1^\circ & F &= \frac{1}{2}(\delta \cdot \beta - \varepsilon \cdot \gamma) \cdot \csc 1^\circ & K &= \delta \cdot \varepsilon \cdot \csc 1^\circ \end{aligned}$$

Si en estas expresiones, se sustituyen los coeficientes exactos por los senos de los aproximados, considerando la aproximación $\sin \Delta = \Delta \cdot \sin 1^\circ$, se obtienen las siguientes relaciones entre los nueve coeficientes aproximados *exactos* (Ae,...,Ee, F,...,K) y los cinco coeficientes aproximados *aproximados* (Aa,...,Ea):

$$Ae = \alpha \cdot \csc 1^\circ = (Aa \cdot \sin 1^\circ) \cdot \csc 1^\circ = Aa = A$$

$$De = (Da \cdot \sin 1^\circ - Ea \cdot \sin 1^\circ \cdot Aa \cdot \sin 1^\circ) \cdot \csc 1^\circ = Da - Ea \cdot A \cdot \sin 1^\circ = Da - Ea \cdot A/57,3$$

Pero teniendo en cuenta que el valor máximo de los coeficientes Ea y A es de 2, resulta que la máxima diferencia entre De y Da es de $2 \cdot 2/57,3 = 0,07$

Igualmente, $Ee = Ea + Da \cdot A/57,3$, siendo también 0,07 la máxima diferencia entre Ee y Ea.

Asimismo,

$$Be = \left[Ba \cdot \sin 1^\circ - \frac{1}{2}(Da \cdot \sin 1^\circ \cdot Ba \cdot \sin 1^\circ + Ea \cdot \sin 1^\circ \cdot Ca \cdot \sin 1^\circ) \right] \cdot \csc 1^\circ$$

$$Be = \left[Ba \cdot \sin 1^\circ - \frac{1}{2}(Da \cdot \sin 1^\circ \cdot Ba \cdot \sin 1^\circ + Ea \cdot \sin 1^\circ \cdot Ca \cdot \sin 1^\circ) \right] \cdot \csc 1^\circ$$

$$Ce = Ca + \frac{1}{2}(Da \cdot Ca \cdot \sin 1^\circ - Ea \cdot Ba \cdot \sin 1^\circ) = Ca + (Da \cdot Ca - Ea \cdot Ba)/114,6$$

Por consiguiente, la máxima diferencia entre Be y Ba se da cuando Da , Ba , Ea y Ca son máximos, y todos tienen el mismo signo; o bien dos tienen un signo, y los otros dos, otro. En cambio, la máxima diferencia entre Ce y Ca se da cuando estos cuatro coeficientes son máximos, pero tres de ellos tienen el mismo signo, y el restante, otro. En cualquier caso, la máxima diferencia también es de 0,07; esto es: $(2 \cdot 2 + 2 \cdot 2)/114,6$

Haciendo un análisis de los coeficientes F , G , se concluye que sus valores máximos son igualmente de 0,07.

Además, $K = Da \cdot Ea/57,3$, de modo que su valor máximo también es de 0,07.

De acuerdo con estos resultados, se puede obtener el error máximo a un rumbo de aguja cardinal (por ejemplo al N):

$$\Delta n(e) = A + Ce + Ee + G + K \quad \Delta n(a) = A + Ca + Ea$$

$$\text{error máx} = \Delta n(e) - \Delta n(a) = (Ce - Ca) + (Ee - Ea) + G + K = 4 \cdot 0,07 = 0,28$$

Análogamente, para un rumbo de aguja cuadrantal (por ejemplo al NE):

$$\Delta n(e) = A + Be \cdot 0,707 + Ce \cdot 0,707 + De + F \cdot 0,707 - G \cdot 0,707 - K$$

$$\Delta n(a) = A + Ba \cdot 0,707 + Ca \cdot 0,707 + Da$$

$$\text{error máx} = (Be - Ba) \cdot 0,707 + (Ce - Ca) \cdot 0,707 + (De - Da) + F \cdot 0,707 - G \cdot 0,707 - K$$

$$\text{error máx} = 4 \cdot 0,07 \cdot 0,707 + 2 \cdot 0,07 = 0,34$$

Por lo tanto, al obviar los coeficientes F, \dots, K cuando ninguno de los coeficientes A, \dots, E es mayor que 2, el error máximo cometido nunca es superior a un tercio de grado a ningún desvío.

CASO PRÁCTICO

Ejercicio 46 (basado en la práctica realizada en el curso de compensador del Centro de Formación de Bamio en abril de 2010): En un lugar de $dm = -3,5$, se compensa un pesquero siguiendo cinco enfilaciones próximas a los rumbos cardinales y a un cuadrantal. En la carta, estas enfilaciones tienen las siguientes demoras: N, 088, 177, 272, 037. A la enfilación próxima al Sm, se actúa sobre los ITs, quedando la aguja al 179,5. Análogamente, cerca del Wm, se compensa con los ILs, quedando la aguja al 274,5. Próximos al Nm y al Em, se leen los siguientes rumbos de aguja: 005,5 y 093,5; y no se tocan los imanes. Finalmente, a la última enfilación, la aguja marca el 044, y tampoco se tocan las esferas. Comprobar si la aguja ha quedado bien compensada, y confeccionar la tablilla de los desvíos residuales cada 15°.

Solución:

Determinación de los desvíos y de los coeficientes:

	N	E	S	W	Cuadrantal
Rv	000	088	177	272	037
-dm	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
R	003,5	091,5	180,5	275,5	040,5
R'	005,5	093,5	179,5	274,5	
Δ	-2	-2	+1	+1	

Tabla 13. Determinación de los rumbos magnéticos y de los desvíos cardinales (resolución del Ejercicio 46). Fuente Propia.

$$A = \frac{1}{4} \sum_{4 \text{ cardinales}} = \frac{1}{4}(-2 - 2 + 1 + 1) = -0,5$$

$$B = \frac{1}{2}(\Delta e - \Delta w) = \frac{1}{2}(-2 - 1) = -1,5$$

$$C = \frac{1}{2}(\Delta n - \Delta s) = \frac{1}{2}(-2 - 1) = -1,5$$

$$E = \frac{1}{4}(\Delta n + \Delta s - \Delta e - \Delta w) = \frac{1}{4}(-2 + 1 + 2 - 1) = 0$$

$$Rc = R - A - B \cdot \sin 40,5 - C \cdot \cos 40,5 = 40,5 + 0,5 + 1,5 \cdot 0,649 + 1,5 \cdot 0,76 = 43,1 \cong 43$$

$$D = (Rc - R') \cdot (-1)^{[40,5/90]} = (Rc - R') \cdot (-1)^0 = Rc - R' = 43 - 44 = -1$$

Ninguno de los cinco coeficientes es mayor que 2. Por tanto, la aguja está bien compensada.

Para confeccionar la tablilla de los desvíos residuales, hay que calcular el desvío a cada rumbo de aguja mediante la fórmula aproximada, considerando los coeficientes obtenidos, para lo cual, se puede emplear una hoja de cálculo como la que se muestra a continuación, en la que también se obtienen los desvíos cardinales y los coeficientes.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		N	E	S	W	Cuadrantal		
2	R	3,5	91,5	180,5	275,5	40,5	43	43,1
3	R'	5,5	93,5	179,5	274,5	44	
4	Δ	-2	-2	1	1	-1	
5								
6	A	B	C	D	E			
7	-0,5	-1,5	-1,5	-1	0			
8								
9	R	Δ	R	Δ	R	Δ	R	Δ
10	0	-2	90	-2	180	1	270	1
11	15	-2,8	105	-1,1	195	0,8	285	0,6
12	30	-3,4	120	-0,2	210	0,7	300	0
13	45	-3,6	135	0,5	225	0,6	315	-0,5
14	60	-3,4	150	0,9	240	0,7	330	-1
15	75	-2,8	165	1,1	255	0,8	345	-1,6

Tabla 14. Hoja de cálculo completa (resolución del Ejercicio 46). Fuente: Propia.

Las fórmulas son:

$$B4=SI(ABS(B2-B3)<180;B2-B3;SI(B2-B3)<-180;B2-B3+360;B2-B3-360))$$

$$C4=C2-C3 \quad D4=D2-D3 \quad E4=E2-E3$$

$$A7=1/4*(B4+C4+D4+E4) \quad B7=1/2*(C4-E4) \quad C7=1/2*(B4-D4) \quad E7=1/4*(B4+D4-C4-E4)$$

$$H2=REDONDEAR(F2-A7-B7*SENO(RADIANES(F2))-C7*COS(RADIANES(F2));1)$$

G2=REDONDEAR(2*H2;0)/2 (se redondea H2 al medio grado)

G4=G2-G3 **D7**=(-1)^ENTERO(F2/90)*G4

B10=REDONDEAR(\$A\$7+\$B\$7*SENO(RADIANES(A10))+\$C\$7*COS(RADIANES(A10))+\$D\$7*SENO(RADIANES(2*A10))+\$E\$7*COS(RADIANES(2*A10)));1)

B10 se copia en B11:B15, D10:D15, F10:F15, H10:H15.

INTERACCIÓN DE LOS COEFICIENTES CUANDO SE SIGUEN ENFILACIONES CUYAS DEMORAS NO COINCIDEN EXACTAMENTE CON LAS CARDINALES

Si se siguen enfilaciones que no coinciden exactamente con los rumbos cardinales, como por ejemplo una cuya demora magnética sea 006 en lugar de N, resulta que cuando se anula su desvío, no se hace $A + C + E = 0$, sino:

$$\Delta = A + B \cdot \sin 6 + C \cdot \cos 6 + D \cdot \sin 12 + E \cdot \cos 12 = 0$$

$$\Delta = A + B \cdot 0,105 + C \cdot 0,995 + D \cdot 0,208 + E \cdot 0,978 = 0$$

Solamente que $D = 2$, este coeficiente introduce un error de $0,416^\circ \approx \frac{1}{2}^\circ$, y si a esta enfilación, todavía no se ha corregido el coeficiente B, de modo que por ejemplo, $B = 5$, se comete un error de $0,525^\circ \approx \frac{1}{2}^\circ$. Luego, es fácil tener un error de 1° . Además, también influye la disminución de los coeficientes C, E (o B, E al E/W) al estar multiplicados por cosenos (o por un seno en el caso de B al E/W), aunque esta reducción no introduce errores tan grandes como los coeficientes B, D al N/S, o los C, D al E/W. Así pues, se observa que los coeficientes interaccionan entre sí: al pretender anular el coeficiente C, inciden el B y el D, y análogamente, al intentar anular el coeficiente B, intervienen el C y el D.

Por consiguiente, si se han tocado los imanes o las esferas durante la compensación, hay que volver a dar otro borneo a los cinco rumbos, ya que los desvíos pueden haber cambiado, al haber variado también los coeficientes. En el segundo borneo, la incidencia de B en los desvíos al N/S, así como la de C al E/W, se puede obviar, pero el efecto del coeficiente D es más problemático, puesto que depende del doble del rumbo, a diferencia del efecto de B, C que solo depende del rumbo.

De estas observaciones, se desprenden dos conclusiones: en primer lugar, se debe procurar que las enfilaciones cardinales sean lo más próximas posible a los rumbos magnéticos cardinales, ya que de esta manera, se minimiza la incidencia de los coeficientes B, C, y en segundo lugar, es importante que el coeficiente D sea prácticamente nulo en el segundo borneo, con lo cual, aunque no se encuentren enfilaciones muy próximas a los rumbos cardinales, desaparece la influencia de D sobre B, C.

En resumen, se debe tener en cuenta que: si los coeficientes B, C tienen un error, también el D, que se calcula a partir de estos, tendrá error, y así toda la tablilla de los desvíos residuales.

Decir por último, que si se siguen los rumbos cardinales exactos mediante un compás giroscópico o satelital, la problemática descrita no existe, y un solo borneo a los cinco rumbos es suficiente.

IV.2.5. Confección de la tablilla de los desvíos residuales a partir de cinco desvíos, usando la regla de Cramer y la ecuación exacta del desvío

El objetivo de este epígrafe es evitar la problemática descrita en el último apartado del epígrafe IV.2.4, en lo que se refiere a la confección de la tablilla de los desvíos residuales cuando se siguen enfilaciones. No obstante, el método que se describe aquí, es aplicable a cualquier tipo de compensación. Por tanto, independientemente de como se haya efectuado la compensación, se toma como punto de partida, para la confección de la tablilla de los desvíos residuales, los cuatro desvíos próximos a los rumbos magnéticos cardinales ($\Delta_{pn}, \dots, \Delta_{pw}$) y uno próximo a un rumbo magnético cuadrantal (Δ_{pc}). Por tanto, se dispone de cinco ecuaciones para determinar los coeficientes $\alpha, \dots, \varepsilon$ de la ecuación exacta del desvío:

$$\sin \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin(2R' + \Delta) + \varepsilon \cdot \cos(2R' + \Delta)$$

Matemáticamente, no son necesarias más ecuaciones para determinar los coeficientes $\alpha, \dots, \varepsilon$. El problema es que la ecuación exacta no es lineal, como es el caso de las series de Fourier. Por consiguiente, para obtener una buena aproximación lineal de la ecuación exacta, hay que desarrollarla en una serie de Fourier que tenga más coeficientes, lo cual implica tomar más desvíos para poder levantar una tablilla con suficiente precisión. Pero esto no siempre es posible cuando se siguen enfilaciones, y aun siendo posible, supone más tiempo y más espacio para efectuar el borneo.

Asimismo, en el segundo apartado del epígrafe IV.2.4, se vio que la fórmula práctica de la ecuación del desvío es suficientemente precisa si los coeficientes son pequeños. Además, la precisión de la fórmula práctica resulta insuficiente solo cuando las varillas d, b son considerables. Por tanto, en los casos habituales, donde las varillas d, b son nulas o pequeñas, se puede considerar la fórmula práctica, con lo cual, se dispone de cinco ecuaciones con cinco incógnitas (los coeficientes A, ..., E).

Luego, el sistema lineal de ecuaciones se puede expresar mediante la siguiente igualdad de matrices:

$$\begin{pmatrix} 1 & \sin R'_{pn} & \cos R'_{pn} & \sin 2R'_{pn} & \cos 2R'_{pn} \\ 1 & \sin R'_{pe} & \cos R'_{pe} & \sin 2R'_{pe} & \cos 2R'_{pe} \\ 1 & \sin R'_{ps} & \cos R'_{ps} & \sin 2R'_{ps} & \cos 2R'_{ps} \\ 1 & \sin R'_{pw} & \cos R'_{pw} & \sin 2R'_{pw} & \cos 2R'_{pw} \\ 1 & \sin R'_{pc} & \cos R'_{pc} & \sin 2R'_{pc} & \cos 2R'_{pc} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_{pn} \\ \Delta_{pe} \\ \Delta_{ps} \\ \Delta_{pw} \\ \Delta_{pc} \end{pmatrix}$$

Sea M es la matriz de orden 5×5 , cuyo determinante es:

$$\det M = \begin{vmatrix} 1 & \sin R'pn & \cos R'pn & \sin 2R'pn & \cos 2R'pn \\ 1 & \sin R'pe & \cos R'pe & \sin 2R'pe & \cos 2R'pe \\ 1 & \sin R'ps & \cos R'ps & \sin 2R'ps & \cos 2R'ps \\ 1 & \sin R'pw & \cos R'pw & \sin 2R'pw & \cos 2R'pw \\ 1 & \sin R'pc & \cos R'pc & \sin 2R'pc & \cos 2R'pc \end{vmatrix}$$

Usando la regla de Cramer para resolver este sistema, resulta que:

$$A = \frac{1}{\det M} \cdot \begin{vmatrix} \Delta pn & \sin R'pn & \cos R'pn & \sin 2R'pn & \cos 2R'pn \\ \Delta pe & \sin R'pe & \cos R'pe & \sin 2R'pe & \cos 2R'pe \\ \Delta ps & \sin R'ps & \cos R'ps & \sin 2R'ps & \cos 2R'ps \\ \Delta pw & \sin R'pw & \cos R'pw & \sin 2R'pw & \cos 2R'pw \\ \Delta pc & \sin R'pc & \cos R'pc & \sin 2R'pc & \cos 2R'pc \end{vmatrix}$$

$$B = \frac{1}{\det M} \cdot \begin{vmatrix} 1 & \Delta pn & \cos R'pn & \sin 2R'pn & \cos 2R'pn \\ 1 & \Delta pe & \cos R'pe & \sin 2R'pe & \cos 2R'pe \\ 1 & \Delta ps & \cos R'ps & \sin 2R'ps & \cos 2R'ps \\ 1 & \Delta pw & \cos R'pw & \sin 2R'pw & \cos 2R'pw \\ 1 & \Delta pc & \cos R'pc & \sin 2R'pc & \cos 2R'pc \end{vmatrix}$$

$$C = \frac{1}{\det M} \cdot \begin{vmatrix} 1 & \sin R'pn & \Delta pn & \sin 2R'pn & \cos 2R'pn \\ 1 & \sin R'pe & \Delta pe & \sin 2R'pe & \cos 2R'pe \\ 1 & \sin R'ps & \Delta ps & \sin 2R'ps & \cos 2R'ps \\ 1 & \sin R'pw & \Delta pw & \sin 2R'pw & \cos 2R'pw \\ 1 & \sin R'pc & \Delta pc & \sin 2R'pc & \cos 2R'pc \end{vmatrix}$$

$$D = \frac{1}{\det M} \cdot \begin{vmatrix} 1 & \sin R'pn & \cos R'pn & \Delta pn & \cos 2R'pn \\ 1 & \sin R'pe & \cos R'pe & \Delta pe & \cos 2R'pe \\ 1 & \sin R'ps & \cos R'ps & \Delta ps & \cos 2R'ps \\ 1 & \sin R'pw & \cos R'pw & \Delta pw & \cos 2R'pw \\ 1 & \sin R'pc & \cos R'pc & \Delta pc & \cos 2R'pc \end{vmatrix}$$

$$E = \frac{1}{\det M} \cdot \begin{vmatrix} 1 & \sin R'pn & \cos R'pn & \sin 2R'pn & \Delta pn \\ 1 & \sin R'pe & \cos R'pe & \sin 2R'pe & \Delta pe \\ 1 & \sin R'ps & \cos R'ps & \sin 2R'ps & \Delta ps \\ 1 & \sin R'pw & \cos R'pw & \sin 2R'pw & \Delta pw \\ 1 & \sin R'pc & \cos R'pc & \sin 2R'pc & \Delta pc \end{vmatrix}$$

Los determinantes se pueden obtener en una hoja de cálculo, empleando la función MDETERM(CASILLA_ELEMENTO_1_1:CASILLA_ELEMENTO_5_5). Ejemplo:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	N	E	S	W	Cuad.			A	B	C	D	E			
2	3	87,5	174	270	41	= R		-0,087	-1,811	1,465	0,359	-1,325			
3	3	88	177	267	41	= R'									
4	0	-0,5	-3	3	0	= Δ									
5															
6	1	0,052	0,999	0,105	0,995	0	0,052	0,999	0,105	0,995	1	0	0,999	0,105	0,995
7	1	0,999	0,035	0,07	-0,998	-0,5	0,999	0,035	0,07	-0,998	1	-0,5	0,035	0,07	-0,998
8	1	0,052	-0,999	-0,105	0,995	-3	0,052	-0,999	-0,105	0,995	1	-3	-0,999	-0,105	0,995
9	1	-0,999	-0,052	0,105	-0,995	3	-0,999	-0,052	0,105	-0,995	1	3	-0,052	0,105	-0,995
10	1	0,656	0,755	0,99	0,139	0	0,656	0,755	0,99	0,139	1	0	0,755	0,99	0,139
11	1	0,052	0	0,105	0,995	1	0,052	0,999	0	0,995	1	0,052	0,999	0,105	0
12	1	0,999	-0,5	0,07	-0,998	1	0,999	0,035	-0,5	-0,998	1	0,999	0,035	0,07	-0,5
13	1	0,052	-3	-0,105	0,995	1	0,052	-0,999	-3	0,995	1	0,052	-0,999	-0,105	-3
14	1	-0,999	3	0,105	-0,995	1	-0,999	-0,052	3	-0,995	1	-0,999	-0,052	0,105	3
15	1	0,656	0	0,99	0,139	1	0,656	0,755	0	0,139	1	0,656	0,755	0,99	0

Tabla 15. Hoja de cálculo para determinar los coeficientes mediante la regla de Cramer. Fuente: Propia.

A6:E10: matriz M, cuyo determinante es el denominador común de A,...,E. En ella,

$A_6, \dots, A_{10} = 1$

$B_6, \dots, B_{10} = \text{SENO}(\text{RADIANES}(A_3, \dots, E_3))$

$C_6, \dots, C_{10} = \text{COS}(\text{RADIANES}(A_3, \dots, E_3))$

$D_6, \dots, D_{10} = \text{SENO}(\text{RADIANES}(2 * A_3, \dots, 2 * E_3))$

$E_6, \dots, E_{10} = \text{COS}(\text{RADIANES}(2 * A_3, \dots, 2 * E_3))$

F6:J10: matriz cuyo determinante es el numerador de A.

Para obtener esta matriz, se copia la matriz A6:E10; se pega en la casilla F6, y se sustituyen los elementos de la primera columna (F) por los desvíos.

K6:O10, A11:E15, F11:J15, K11:O15: matrices cuyos determinantes son los numeradores de B, C, D, E respectivamente. Se obtienen de forma análoga a la matriz F6:J10, cambiando en cada caso, la columna correspondiente.

$H_2 = \text{MDETERM}(F_6:J_{10}) / \text{MDETERM}(\$A\$6:\$E\$10)$

Se copia esta fórmula, y se pega en las casillas I2, J2, K2, L2, cambiando F6:J10 por la matriz correspondiente; es decir: K6:O10, A11:E15, F11:J15, K11:O15 respectivamente.

$I_2, J_2, K_2, L_2 = \text{MDETERM}(\text{MATRIZ_CORRESPONDIENTE}) / \text{MDETERM}(\$A\$6:\$E\$10)$

En una tabla adicional (como la comprendida entre las filas 9 y 15 de la Tabla 14), se calculan los desvíos mediante la fórmula práctica. Ejemplo:

	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	R	Δ	R	Δ	R	Δ	R	Δ
2	0	0,052	90	-0,574	180	-2,877	270	3,049
3	15	-0,11	105	-1,248	195	-2,001	285	3,009
4	30	-0,077	120	-2,037	210	-0,802	300	2,566
5	45	0,026	135	-2,762	225	0,516	315	1,87
6	60	0,049	150	-3,235	240	1,722	330	1,114
7	75	-0,131	165	-3,298	255	2,61	345	0,469

Tabla 16. Tablilla de los desvíos residuales, usando la fórmula práctica, con los coeficientes de la Tabla 15. Fuente Propia.

$$Q2=H\$2+I\$2*SENO(RADIANES(P2))+J\$2*COS(RADIANES(P2))+K\$2*SENO(RADIANES(2*P2))+L\$2*COS(RADIANES(2*P2))$$

Se copia esta fórmula, y se pega en las casillas Q3:Q7, S2:S7, U2:U7, W2:W7.

La Tabla 16 se podría considerar como definitiva, pero dado que los cálculos se realizan automáticamente en la hoja de cálculo, se toma esta tabla solo como la correspondiente a los desvíos a introducir en el segundo miembro de la ecuación exacta del desvío:

$$\sin \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin(2R' + \Delta) + \varepsilon \cdot \cos(2R' + \Delta)$$

Procediendo de esta forma, no es necesario redondear ni los coeficientes ni los desvíos, como se hizo en la Tabla 14. Asimismo, por ser los desvíos ángulos pequeños, y más aún los desvíos residuales, se puede sustituir $\sin \Delta$ por $\Delta \cdot \sin 1^\circ$, con lo cual, la ecuación exacta queda:

$$\Delta = \alpha \cdot \csc 1^\circ \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin R' + \gamma \cdot \csc 1^\circ \cdot \cos R' + \delta \cdot \csc 1^\circ \cdot \sin(2R' + \Delta) + \varepsilon \cdot \csc 1^\circ \cdot \cos(2R' + \Delta)$$

donde se considera $\alpha \cdot \csc 1^\circ = A$, y análogamente para los otros coeficientes, de modo que:

$$\Delta = A \cdot \cos \Delta + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin(2R' + \Delta) + E \cdot \cos(2R' + \Delta)$$

Así pues, se confecciona una segunda tabla adicional, empleando esta fórmula para obtener el desvío a cada rumbo de aguja, y siendo el desvío que se introduce en ella, el desvío obtenido para el mismo rumbo en la Tabla 16. Esta segunda tabla (Tabla 17) ya se puede considerar como la tablilla de los desvíos residuales.

	P	Q	R	S	T	U	V	W
9	R	Δ	R	Δ	R	Δ	R	Δ
10	0	0,052	90	-0,57	180	-2,893	270	3,028
11	15	-0,112	105	-1,227	195	-2,035	285	2,957
12	30	-0,079	120	-1,99	210	-0,821	300	2,506
13	45	0,026	135	-2,698	225	0,528	315	1,827
14	60	0,05	150	-3,178	240	1,751	330	1,095
15	75	-0,132	165	-3,275	255	2,625	345	0,466

Tabla 17. Tablilla de los desvíos residuales, usando la ecuación exacta, con los coeficientes de la Tabla 15 y los desvíos de la Tabla 16. Fuente: Propia.

$$Q10=REDONDEAR(H\$2*COS(RADIANES(Q2))+I\$2*SENO(RADIANES(P10))+J\$2*COS(RADIANES(P10))+K\$2*SENO(RADIANES(2*P10+Q2))+L\$2*COS(RADIANES(2*P10+Q2)));1)$$

Nota: Para ver la diferencia entre los valores de las Tablas 16 y 17, en esta última, no se han redondeado los desvíos, como se indica en la fórmula de Q10.

Se copia esta fórmula, y se pega en las casillas Q11:Q15, S10:S15, U10:U15, W10:W15.

Finalmente, con los desvíos de la Tabla 17, se puede obtener la curva de los desvíos residuales. Basta con ordenar los veinticuatro desvíos en una misma fila (la fila 17 en el ejemplo de las Tablas 15, 16 y 17), y en la fila superior (la 16), colocar las iniciales de los ocho rumbos principales en las casillas correspondientes, de modo que la gráfica tenga: por abscisas, los veinticuatro rumbos, de los cuales solo aparezcan los nombres de ocho (para tener una presentación clara), y por ordenadas, los veinticuatro desvíos. Ejemplo:

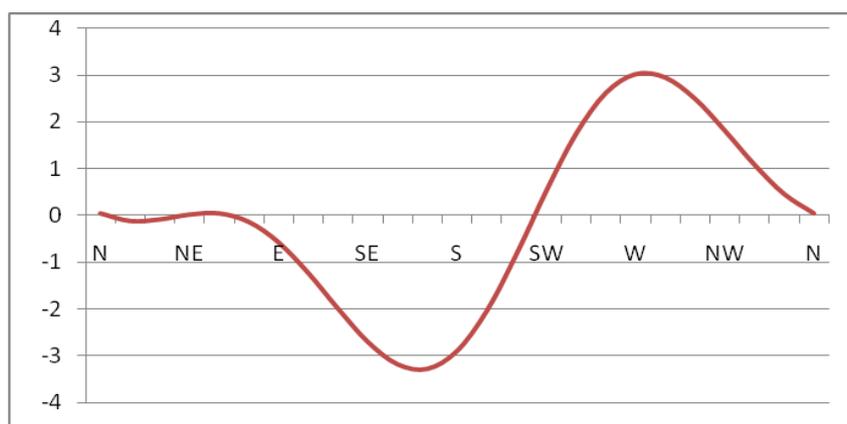


Figura 91. Curva de los desvíos residuales correspondiente a la Tabla 17. Fuente: Propia.

Si se toman los veinticuatro desvíos en lugar de solo los ocho principales, como se hizo con las curvas de las Figuras 31, 89 y 90, resulta una gráfica mejor definida. Asimismo, de forma análoga a la introducción de la novena columna cuando solo se consideran ocho desvíos, en este caso, es necesaria la incorporación de una vigésima quinta columna igual que la primera.

IV.2.6. Generalización del método expuesto en el epígrafe IV.2.4 para cualquier valor de las varillas d, b

Supóngase que se han anulado (o reducido) los desvíos a dos rumbos magnéticos separados 90°, por ejemplo al E y al N. Luego, si al opuesto de uno de ellos (por ejemplo al W), el desvío es excesivo, se debe anular la mitad de este desvío, lo cual hará que cambie el desvío que previamente se anuló (o se redujo). Por tanto:

Antes de la compensación,

$$\Delta e = A + B - E$$

Pero después de actuar sobre los ILs al Em, se obtiene un nuevo coeficiente B', así como un desvío residual a dicho rumbo ($\Delta'e$), el cual es nulo o prácticamente cero:

$$\Delta'e = A + B' - E \quad (i)$$

Luego, al arrumbar al Wm, aparece el siguiente desvío:

$$\Delta w = A - B' - E \quad (\text{ii})$$

El cual hay que reducir a la mitad. Para ello, se actúa sobre los ILs al W_m , de manera que se obtiene un nuevo coeficiente B'' , así como un desvío residual a dicho rumbo ($\Delta'w$), el cual no es nulo:

$$\Delta'w = A - B'' - E \quad (\text{iii})$$

En este momento, los coeficientes A , B , E residuales son: A , B'' , E , y en consecuencia, el desvío residual al E ($\Delta''e$) es:

$$\Delta''e = A + B'' - E \quad (\text{iv})$$

Restando (iii) de (ii), se obtiene:

$$\Delta w - \Delta'w = B'' - B'$$

Por tanto,

$$B'' = B' + \Delta w - \Delta'w$$

Con lo cual, sustituyendo en (iv), resulta:

$$\Delta''e = A + B' + \Delta w - \Delta'w - E \quad (\text{v})$$

Pero según (i),

$$B' = \Delta'e - A + E$$

Luego, sustituyendo en (v), se tiene:

$$\Delta''e = A + (\Delta'e - A + E) + \Delta w - \Delta'w - E$$

$$\Delta''e = \Delta'e + \Delta w - \Delta'w$$

donde los tres desvíos son conocidos.

CONCLUSIÓN

Este resultado pone de manifiesto que no es necesario dar un segundo borneo para obtener los desvíos a los rumbos cardinales a los que ya se anuló (o se redujo) el desvío, aunque se haya modificado el desvío a sus rumbos magnéticos opuestos. Por tanto, si las esferas están colocadas, con un solo borneo a los cuatro rumbos magnéticos cardinales, se puede compensar el desvío semicircular, y determinar los coeficientes A , B , C , E residuales.

Asimismo, de acuerdo con la conclusión del epígrafe IV.2.3, este resultado es válido para cualquier valor de las varillas d , b , ya que el desvío semicircular queda bien compensado. El problema que presentaba el método expuesto en el epígrafe IV.2.4, era que: si no se anulaba la mitad del desvío a los rumbos opuestos, los coeficientes B , C residuales podían ser demasiado grandes.

No obstante, hay que tener en cuenta que este desarrollo es válido si los rumbos que se siguen al compensar son exactamente los magnéticos y no otros próximos.

IV.3. Selección del rumbo cuadrantal: problemática del quinto rumbo

IV.3.1. Introducción

Una vez determinados los coeficientes residuales A, B, C, E, solo es necesario aproar a un rumbo magnético cuadrantal para determinar el coeficiente D. Para ello, se puede ir directamente a un rumbo magnético cuadrantal, o bien a un rumbo magnético *corregido* (Rc), según lo indicado en el epígrafe IV.2.4.

No obstante, si se toman los cuatro desvíos cuadrantales, la experiencia demuestra que: cuando se determina el coeficiente D con cada uno de ellos, tres proporcionan un D parecido, y por tanto, las tres curvas de los desvíos residuales que se obtienen con cada uno de estos tres desvíos, son parecidas entre sí; pero uno de ellos da un D notablemente diferente, y en consecuencia, una curva diferente, tanto de las otras tres, como de la media (Guerra, 2020, p. 99; Ramsden, 2015, p. 115). A este hecho, se le denomina *problemática del quinto rumbo*.

Por consiguiente, el problema de levantar la tablilla o curva de los desvíos residuales con solo cinco rumbos es que: si se toma el desvío cuadrantal que se desajusta, la curva puede ser considerablemente distinta a la que se obtendría considerando los ocho desvíos a los rumbos principales. En consecuencia, se pretende conocer el rumbo cuadrantal cuyo desvío se desajusta, a fin de evitarlo. A este rumbo, se le denominará *rumbo erróneo*.

IV.3.2. Hipótesis de la causa: influencia de los desvíos sextantal y octantal

De acuerdo con los resultados del capítulo II.3 (p. 67), cuando se consideran los ocho desvíos a los rumbos principales y los ocho coeficientes A,...,K, los valores de los coeficientes son:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{8} \sum_8 \Delta & B &= \frac{1}{4} [\Delta e - \Delta w + (\Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) \cdot 0,707] \\ D &= \frac{1}{4} (\Delta ne + \Delta sw - \Delta se - \Delta nw) & C &= \frac{1}{4} [\Delta n - \Delta s + (\Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw) \cdot 0,707] \\ E &= \frac{1}{4} (\Delta n + \Delta s - \Delta e - \Delta w) & F &= \frac{1}{4} [\Delta w - \Delta e + (\Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) \cdot 0,707] \\ K &= \frac{1}{8} (\sum_4 \Delta_{\text{cardinales}} - \sum_4 \Delta_{\text{cuadrantales}}) & G &= \frac{1}{4} [\Delta n - \Delta s - (\Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw) \cdot 0,707] \end{aligned}$$

Sin embargo, cuando se consideran solo cinco desvíos (los cuatro cardinales y un cuadrantal), los coeficientes de la fórmula práctica del desvío no son estos coeficientes A,...,E, sino \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} ²¹, D, E; donde:

$$\bar{A} = \frac{1}{4} (\Delta n + \Delta e + \Delta s + \Delta w) \quad \bar{B} = \frac{1}{2} (\Delta e - \Delta w) \quad \bar{C} = \frac{1}{2} (\Delta n - \Delta s)$$

A continuación, se determinan las relaciones entre los coeficientes A, B, C y \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} :

²¹ De aquí en adelante, en este capítulo, los coeficientes A, B, C de la fórmula práctica del desvío, se denominarán \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , para distinguirlos de los coeficientes A, B, C de la ecuación aproximada que tiene en cuenta los desvíos sextantal y octantal.

$$\begin{aligned}
 8A &= \Delta n + \Delta e + \Delta s + \Delta w + \Delta ne + \Delta se + \Delta sw + \Delta nw \\
 8K &= \Delta n + \Delta e + \Delta s + \Delta w - \Delta ne - \Delta se - \Delta sw - \Delta nw \\
 8A + 8K &= 2\Delta n + 2\Delta e + 2\Delta s + 2\Delta w
 \end{aligned}$$

Por consiguiente,

$$A + K = \frac{1}{4}(\Delta n + \Delta e + \Delta s + \Delta w) = \bar{A} \Rightarrow A = \bar{A} - K$$

Asimismo, de las expresiones de B, C, F, G obtenidas en el epígrafe IV.2.3 (p. 178), resulta:

$$B - F = \frac{1}{2}(\Delta e - \Delta w) = \bar{B} \Rightarrow B = \bar{B} + F \quad C + G = \frac{1}{2}(\Delta n - \Delta s) = \bar{C} \Rightarrow C = \bar{C} - G$$

Con lo cual, la ecuación aproximada que tiene en cuenta los desvíos sextantal y octantal, se puede expresar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \Delta = \bar{A} - K + \bar{B} \cdot \sin R' + F \cdot \sin R' + \bar{C} \cdot \cos R' - G \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + \\
 + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + K \cdot \cos 4R'
 \end{aligned}$$

En consecuencia, cuando se emplea la fórmula práctica del desvío ($\Delta = \bar{A} + \bar{B} \cdot \sin R' + \bar{C} \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R'$), se obvia el siguiente sumatorio de términos (Θ):

$$\Theta = -K + F \cdot \sin R' - G \cdot \cos R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + K \cdot \cos 4R'$$

Relacionando este hecho con la problemática del quinto rumbo, se plantea la siguiente hipótesis:

Al determinar el coeficiente D a partir del desvío residual a un rumbo cuadrantal y de los coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} residuales, resulta que: Θ se puede obviar en tres rumbos cuadrantales, pero no en uno de ellos. Por tanto, se trata de determinar a qué rumbo cuadrantal, Θ adquiere un valor significativo.

La condición que se debe cumplir para que $\Theta = 0$, a cada uno de los rumbos cuadrantales, es:

$$\begin{aligned}
 \Theta_{ne} = 0 &\Rightarrow -K + F \cdot \sin 45^\circ - G \cdot \cos 45^\circ + F \cdot \sin 135^\circ + G \cdot \cos 135^\circ + K \cdot \cos 180^\circ = 0 \\
 \Theta_{ne} = 0 &\Rightarrow -K + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K = 0 \Rightarrow F - G = K \cdot \sqrt{2} \\
 \Theta_{se} = 0 &\Rightarrow -K + F \cdot \sin 135^\circ - G \cdot \cos 135^\circ + F \cdot \sin 45^\circ + G \cdot \cos 45^\circ + K \cdot \cos 180^\circ = 0 \\
 \Theta_{se} = 0 &\Rightarrow -K + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K = 0 \Rightarrow F + G = K \cdot \sqrt{2} \\
 \Theta_{sw} = 0 &\Rightarrow -K + F \cdot \sin 225^\circ - G \cdot \cos 225^\circ + F \cdot \sin 315^\circ + G \cdot \cos 315^\circ + K \cdot \cos 180^\circ = 0 \\
 \Theta_{sw} = 0 &\Rightarrow -K - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K = 0 \Rightarrow -F + G = K \cdot \sqrt{2} \\
 \Theta_{nw} = 0 &\Rightarrow -K + F \cdot \sin 315^\circ - G \cdot \cos 315^\circ + F \cdot \sin 225^\circ + G \cdot \cos 225^\circ + K \cdot \cos 180^\circ = 0 \\
 \Theta_{nw} = 0 &\Rightarrow -K - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K = 0 \Rightarrow -F - G = K \cdot \sqrt{2}
 \end{aligned}$$

Pero *a priori*, estos resultados no son útiles para la resolución de la problemática del quinto rumbo.

Sin embargo, como se ha indicado, se trata de determinar a qué rumbo cuadrantal, Θ adquiere un valor significativo, y esto ocurre a los rumbos próximos a aquellos en que la función Θ

adquiere un valor máximo o mínimo, siendo los rumbos correspondientes a los máximos y mínimos de Θ , los que cumplen la siguiente condición:

$$\frac{d\Theta}{dR'} = \frac{d}{dR'}(-K + F \cdot \sin R' - G \cdot \cos R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + K \cdot \cos 4R') = 0$$

$$F \cdot \cos R' + G \cdot \sin R' + 3F \cdot \cos 3R' - 3G \cdot \sin 3R' - 4K \cdot \sin 4R' = 0$$

Conviene señalar que el valor medio de Θ a lo largo de los 360° no tiene por que ser cero. No obstante, el promedio de Θ es un valor que no se considera al obtener el coeficiente D a partir de los cuatro desvíos cuadrantales. Por tanto, lo que precisamente interesa es identificar las variaciones sobre este promedio.

A continuación, se analiza la ecuación obtenida, suponiendo que los rumbos cuadrantales corresponden a un valor extremo (máximo o mínimo) de Θ , con el objetivo de poder obtener la condición que debe cumplir un determinado rumbo cuadrantal para que corresponda a un valor extremo de Θ , y poder extrapolar el resultado obtenido a rumbos cuadrantales que no correspondan exactamente a valores extremos de Θ , pero sí que sean próximos a los rumbos extremos (los correspondientes a un valor extremo de Θ), de manera que se puedan identificar los rumbos cuadrantales próximos a los rumbos extremos, a fin de no calcular el coeficiente D con el desvío a estos rumbos.

Al NE,

$$F \cdot \cos 45^\circ + G \cdot \sin 45^\circ + 3F \cdot \cos 135^\circ - 3G \cdot \sin 135^\circ - 4K \cdot \sin 180^\circ = 0$$

$$F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - 3F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - 3G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 0 \Rightarrow -F \cdot \sqrt{2} - G \cdot \sqrt{2} = 0 \Rightarrow F = -G$$

Al SE,

$$F \cdot \cos 135^\circ + G \cdot \sin 135^\circ + 3F \cdot \cos 45^\circ - 3G \cdot \sin 45^\circ - 4K \cdot \sin 180^\circ = 0$$

$$-F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 3F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - 3G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 0 \Rightarrow F \cdot \sqrt{2} - G \cdot \sqrt{2} = 0 \Rightarrow F = G$$

Al SW,

$$F \cdot \cos 225^\circ + G \cdot \sin 225^\circ + 3F \cdot \cos 315^\circ - 3G \cdot \sin 315^\circ - 4K \cdot \sin 180^\circ = 0$$

$$-F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 3F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 3G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 0 \Rightarrow F \cdot \sqrt{2} + G \cdot \sqrt{2} = 0 \Rightarrow F = -G$$

Al NW,

$$F \cdot \cos 315^\circ + G \cdot \sin 315^\circ + 3F \cdot \cos 225^\circ - 3G \cdot \sin 225^\circ - 4K \cdot \sin 180^\circ = 0$$

$$F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - 3F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 3G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 0 \Rightarrow -F \cdot \sqrt{2} + G \cdot \sqrt{2} = 0 \Rightarrow F = G$$

La igualdad entre los valores absolutos de F y G, solo se dará si el rumbo cuadrantal que se considera, coincide con un rumbo extremo. No obstante, si el rumbo cuadrantal es próximo a un rumbo extremo, aunque los valores absolutos de F y G no coincidan, sus signos sí deben cumplir la siguiente condición:

Al NE y al SW, los coeficientes F y G tienen distinto signo; mientras que al SE y al NW, tienen el mismo signo.

Esta es una condición necesaria que debe cumplir el rumbo cuadrantal erróneo, pero queda por probar que sea una condición suficiente, lo cual se realiza a continuación.

Puesto que Θ es la suma de varias funciones circulares y de una constante ($-K$), sus puntos de inflexión deben coincidir con los puntos en que $\Delta = -K$. Si no hubiera la constante, los puntos de inflexión coincidirían con los ceros ($\Delta = 0$). Por tanto, hay una relación entre los ceros y los puntos de inflexión, siendo estos últimos, los que cumplen la siguiente condición:

$$\frac{d^2\Theta}{(dR')^2} = \frac{d}{dR'} (F \cdot \cos R' + G \cdot \sin R' + 3F \cdot \cos 3R' - 3G \cdot \sin 3R' - 4K \cdot \sin 4R') = 0$$

$$-F \cdot \sin R' + G \cdot \cos R' - 9F \cdot \sin 3R' - 9G \cdot \cos 3R' - 16K \cdot \cos 4R' = 0$$

En este caso, se analiza la ecuación obtenida, suponiendo que los rumbos cuadrantales corresponden a puntos de inflexión, con el fin de extrapolar el resultado a rumbos cuadrantales que no correspondan exactamente a dichos puntos, pero sí que sean próximos a los rumbos correspondientes a ellos, de igual manera a como se ha efectuado con los máximos y mínimos.

Al NE,

$$-F \cdot \sin 45^\circ + G \cdot \cos 45^\circ - 9F \cdot \sin 135^\circ - 9G \cdot \cos 135^\circ - 16K \cdot \cos 180^\circ = 0$$

$$-F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - 9F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 9G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 16K = 0 \Rightarrow -5F \cdot \sqrt{2} + 5G \cdot \sqrt{2} + 16K = 0 \Rightarrow F - G = K \cdot 1,6 \cdot \sqrt{2}$$

Al SE,

$$-F \cdot \sin 135^\circ + G \cdot \cos 135^\circ - 9F \cdot \sin 45^\circ - 9G \cdot \cos 45^\circ - 16K \cdot \cos 180^\circ = 0$$

$$-F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - 9F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - 9G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 16K = 0 \Rightarrow F + G = K \cdot 1,6 \cdot \sqrt{2}$$

Al SW,

$$-F \cdot \sin 225^\circ + G \cdot \cos 225^\circ - 9F \cdot \sin 315^\circ - 9G \cdot \cos 315^\circ - 16K \cdot \cos 180^\circ = 0$$

$$F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 9F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - 9G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 16K = 0 \Rightarrow -F + G = K \cdot 1,6 \cdot \sqrt{2}$$

Al NW,

$$-F \cdot \sin 315^\circ + G \cdot \cos 315^\circ - 9F \cdot \sin 225^\circ - 9G \cdot \cos 225^\circ - 16K \cdot \cos 180^\circ = 0$$

$$F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 9F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 9G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + 16K = 0 \Rightarrow -F - G = K \cdot 1,6 \cdot \sqrt{2}$$

Se observa una clara analogía entre estos resultados y los obtenidos al considerar $\Theta = 0$.

Asimismo, puesto que el valor medio de Θ es $-K$, y tal como se ha apuntado, lo que interesa es identificar las variaciones sobre este valor, resulta que: para averiguar la condición que deben cumplir los coeficientes F y G para que un determinado rumbo cuadrantal corresponda a un cero o a un punto de inflexión de la función Θ , se puede considerar $K = 0$. En este caso, los ceros o puntos de inflexión, se llamarán pseudoceros.

En consecuencia, la condición que debe cumplir cada rumbo cuadrantal para ser un pseudocero es:

$$\begin{array}{ll} \text{NE: } F - G = 0 \Rightarrow F = G & \text{SE: } F + G = 0 \Rightarrow F = -G \\ \text{SW: } -F + G = 0 \Rightarrow F = G & \text{NW: } -F - G = 0 \Rightarrow F = -G \end{array}$$

O sea: para que los rumbos NE y SW sean pseudoceros, los coeficientes F y G deben tener el mismo signo; mientras que para que lo sean los rumbos SE y NW, los coeficientes F y G deben tener diferente signo. Este resultado es coherente con el que determina la condición necesaria para que un rumbo cuadrantal sea próximo a un rumbo extremo, ya que se trata de la condición opuesta.

Luego, si bien este último resultado no demuestra categóricamente que la regla de signos de F y G es una condición suficiente para determinar el rumbo cuadrantal erróneo, sí prueba que: los signos de F y G determinan si un rumbo cuadrantal concreto está más cerca de un rumbo extremo o de un pseudocero.

Por tanto, si F y G tienen distinto signo, no se debe calcular el coeficiente D con los desvíos al NE o al SW, puesto que estos rumbos están más cerca de un rumbo extremo que de un pseudocero, de modo que: con uno de los desvíos al NE o al SW, por causa del valor medio de la función Θ , el coeficiente D dará parecido al obtenido mediante los desvíos al SE y al NW; pero con el otro desvío, dará diferente. Asimismo, si F y G tienen el mismo signo, no se debe calcular D con los desvíos al SE o al NW.

En resumen: si F y G tienen distinto signo, el rumbo cuadrantal erróneo es el NE o el SW; mientras que si F y G tienen el mismo signo, el rumbo cuadrantal erróneo es el SE o el NW.

IV.3.3. Verificación del resultado obtenido para la determinación del rumbo cuadrantal erróneo

En el TFM de Ramsden San Juan, se analizan las curvas de los desvíos residuales obtenidas en dos compensaciones, según el rumbo cuadrantal que se considere.

En la compensación del buque HÖEGH JACKSONVILLE, un car carrier operado por la compañía Höegh Autoliners, se obtuvieron los siguientes desvíos residuales:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ	1	0	1	1,5	1	0	1	1

Tabla 18. Desvíos residuales del buque HÖEGH JACKSONVILLE. Fuente: Propia.

En las Figuras 92 y 93, se muestran las curvas de los desvíos, según se calcule D con el desvío al NE (azul), al SE (rojo), al SW (verde), al NW (amarillo), con el promedio de los cuatro desvíos, es decir, $D = \frac{1}{4} \cdot (\Delta_{ne} + \Delta_{sw} - \Delta_{se} - \Delta_{nw})$ (naranja) o interpolando (negro), siendo la curva que se desajusta, la correspondiente al NW.

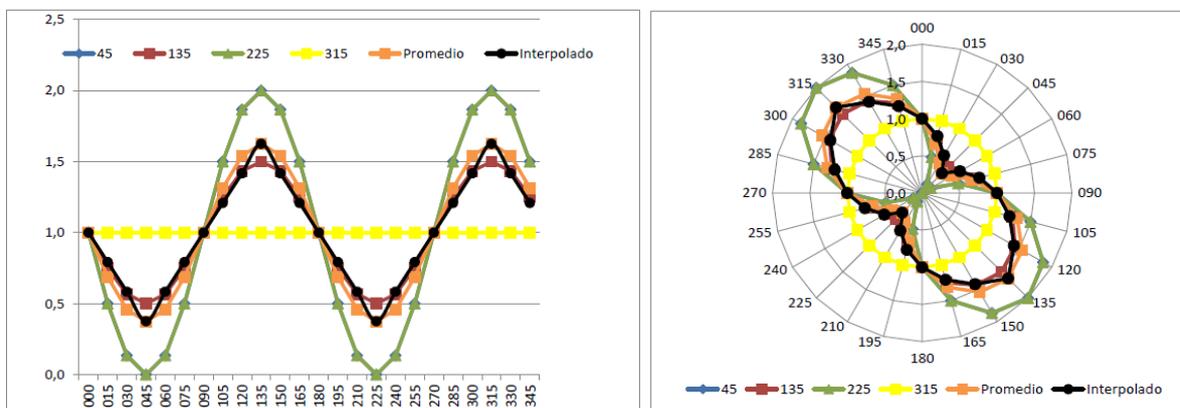


Figura 92. Gráficas cartesianas de los desvíos residuales del buque HÖEGH JACKSONVILLE, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Ramsden, 2015, p. 85.

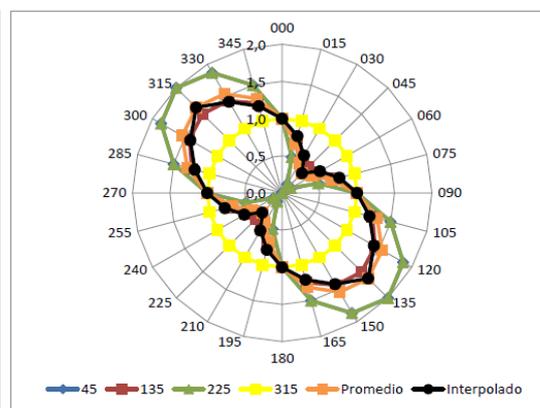


Figura 93. Gráficas polares de los desvíos residuales del buque HÖEGH JACKSONVILLE, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Ramsden, 2015, p. 85.

Calculando el valor de los coeficientes F y G, resulta que:

$$F = \frac{1}{4} [\Delta w - \Delta e + (\Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}] = \frac{1}{4} [1 - 1 + (0 + 1,5 - 0 - 1) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}] = \frac{1}{4} \cdot 0,5 \cdot 0,707 : \text{positivo}$$

$$G = \frac{1}{4} [\Delta n - \Delta s - (\Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}] = \frac{1}{4} [1 - 1 - (0 + 1 - 1,5 - 0) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}] = \frac{1}{4} \cdot 0,5 \cdot 0,707 : \text{positivo}$$

Luego, F y G tienen el mismo signo, con lo cual, de acuerdo con el resultado del epígrafe IV.3.2, el rumbo cuadrantal erróneo debe ser el SE o el NW, como así es (NW).

Asimismo, en la compensación del buque ALLURE OF THE SEAS, un crucero de compañía Royal Caribbean, se tomaron los siguientes desvíos residuales:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ	1	-3	-1	1	2	2	0,5	0

Tabla 19. Desvíos residuales del buque ALLURE OF THE SEAS. Fuente: Propia.

En este caso, se obtuvieron las siguientes curvas, donde se observa que la que se desajusta es la correspondiente al NE:

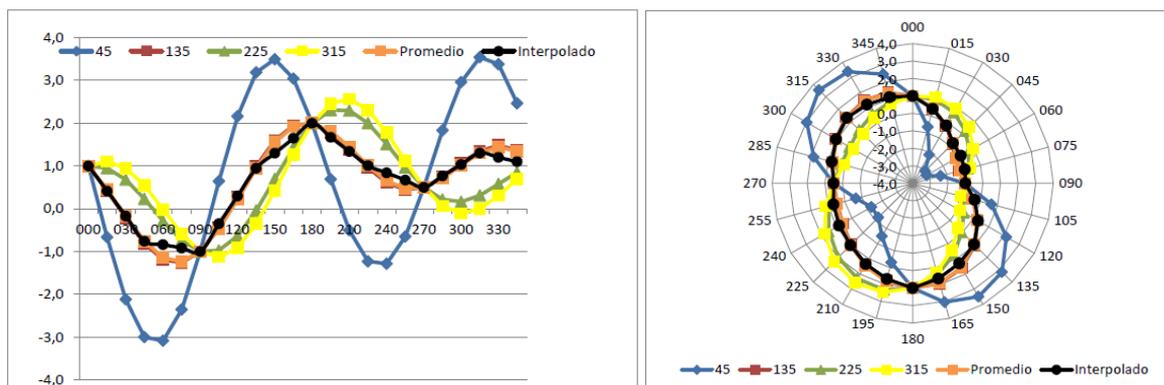


Figura 94. Gráficas cartesianas de los desvíos residuales del buque ALLURE OF THE SEAS, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Ramsden, 2015, p. 104. (corresponde a la Figura 63)

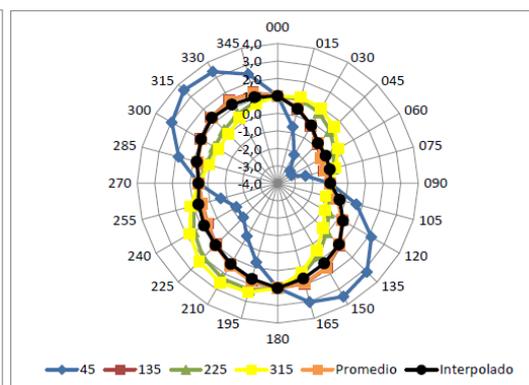


Figura 95. Gráficas polares de los desvíos residuales del buque ALLURE OF THE SEAS, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Ramsden, 2015, p. 104. (corresponde a la Figura 64)

Calculando el valor de los coeficientes F y G, resulta que:

$$F = \frac{1}{4} [\Delta w - \Delta e + (\Delta ne + \Delta se - \Delta sw - \Delta nw) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}]$$

$$F = \frac{1}{4} \left[0,5 + 1 + (-3 + 1 - 2 - 0) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \right] = \frac{1}{4} (1,5 - 4 \cdot 0,707) = \frac{1}{4} (1,5 - 2,828): \text{negativo}$$

$$G = \frac{1}{4} \left[\Delta n - \Delta s - (\Delta ne + \Delta nw - \Delta se - \Delta sw) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \right]$$

$$G = \frac{1}{4} \left[1 - 2 - (-3 + 0 - 1 - 2) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \right] = \frac{1}{4} (-1 + 6 \cdot 0,707) = \frac{1}{4} (-1 + 4,242): \text{positivo}$$

Luego, F y G tienen diferente signo, con lo cual, de acuerdo con el resultado del epígrafe IV.3.2, el rumbo cuadrantal erróneo debe ser el NE o el SW, como así es (NE).

En el TFG de Guerra Piqué, se analizan dos ejemplos más: las compensaciones de los yates TALITHA y MAILYN IV.

Los desvíos residuales obtenidos en la compensación del yate TALITHA fueron los siguientes:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ	3	3,5	2	1	0,5	0,5	1,5	0

Tabla 20. Desvíos residuales del yate TALITHA. Fuente: Propia.

Con estos desvíos, se determinan los ocho coeficientes A,...,K:

A	B	C	D	E	F	G	K
1,5	0,832	0,979	0,75	0	0,582	0,272	0,25

Tabla 21. Coeficientes A,...,K residuales del yate TALITHA. Fuente: Propia.

Y a partir de estos coeficientes, se obtiene la curva de los desvíos residuales que considera los desvíos sextantal y octantal, correspondiente al trazo en azul claro (referencia 8 R) de la Figura 96.

Asimismo, con los desvíos a los rumbos cardinales, se obtienen los siguientes coeficientes:

\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E
1,75	0,25	1,25	0

Tabla 22. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del yate TALITHA. Fuente: Propia.

Luego, según el desvío al rumbo cuadrantal que se considere, resultan las siguientes curvas:

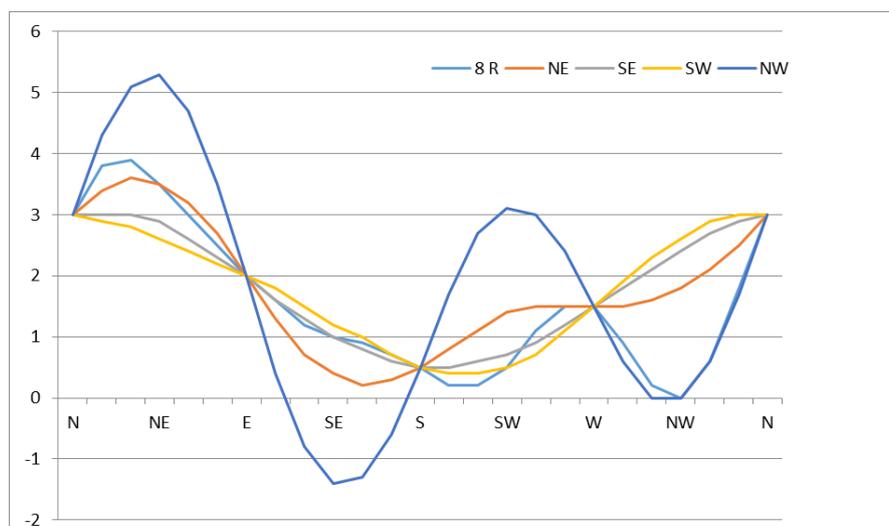


Figura 96. Desvíos residuales del yate TALITHA, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.

Se observa que la curva que se desajusta es la correspondiente al NW, lo que indica que: de acuerdo con el resultado del epígrafe IV.3.2, los coeficientes F y G deben tener el mismo signo, como así es (ambos positivos).

Por su parte, los desvíos residuales del yate MAILYN IV fueron los siguientes:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ	1,5	1,5	2,5	-2,5	-3,5	-1,5	-1,5	-2,5

Tabla 23. Desvíos residuales del yate MAILYN IV. Fuente: Propia.

Y con ellos, se determinan los ocho coeficientes A,...,K, a la vez que con los cuatro cardinales, se obtienen los coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E :

A	B	C	D	E	F	G	K
-0,75	1,530	1,780	1,25	-0,75	-0,470	0,720	0,5

Tabla 24. Coeficientes A,...,K residuales del yate MAILYN IV. Fuente: Propia.

\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E
-0,25	2	2,5	-0,75

Tabla 25. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del yate MAILYN IV. Fuente: Propia.

Luego, según el desvío al rumbo cuadrantal que se considere, resultan las siguientes curvas:

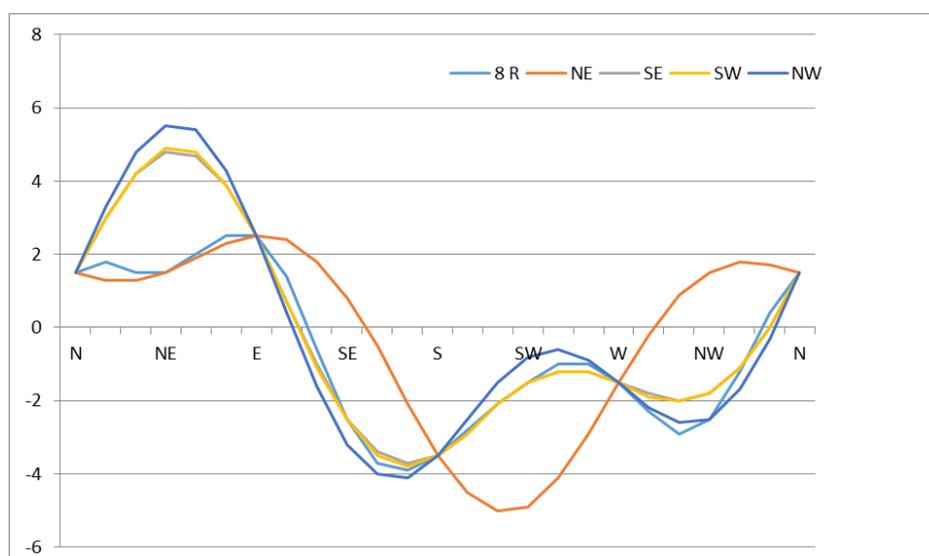


Figura 97. Desvíos residuales del yate MAILYN IV, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.

En este caso, la curva que se desajusta es la correspondiente al NE, lo que indica que: de acuerdo con el resultado del epígrafe IV.3.2, los coeficientes F y G deben tener distinto signo, como así es (F negativo y G positivo).

En los cuatro ejemplos expuestos, se han considerado los desvíos residuales, que son los únicos de los que se suele dejar constancia. No obstante, durante la investigación de campo de la tesis doctoral del profesor Arribalzaga, se obtuvieron los desvíos de unas agujas sin compensar, las cuales se instalaron en los siguientes buques:

i) Buque escuela de pesca ORTZE, del IES Nauticopesquero Blas de Lezo, en Pasajes (Guipúzcoa).

ii) Lancha de amarre y servicios portuarios VILLA DE PORTUGALETE, de la empresa Servicios Generales Marítimos, S.A. (SEGEMAR).

En ellos, se instaló el compás magnético integral (CMI), el cual, entre otras aplicaciones, obtiene los desvíos por comparación con los rumbos giroscópico o satelital, teniendo en cuenta la declinación magnética del lugar, y almacena los desvíos calculados, de modo que, en todo momento, se dispone de una tablilla de desvíos actualizada.



Figura 98. Fotografía del CMI instalado a bordo del buque ORTZE, en el que figuran los desvíos obtenidos y los coeficientes A,...E. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 116. (izda.)

Figura 99. Desvíos obtenidos (corresponde a la Figura 63). Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 116. (centro)

Figura 100. Coeficientes A,...E. Fuente: Arribalzaga, 2016, p. 117. (dcha.)

Los ocho desvíos principales obtenidos de la aguja que se instaló en el buque ORTZE fueron:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ	17,737	3,933	-12,272	-24,381	-20,186	-4,186	11,335	19,136

Tabla 26. Desvíos de la aguja que se instaló en el buque ORTZE. Fuente: Propia.

Luego, los coeficientes A,...,K, obtenidos con los ocho desvíos, y los coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E, obtenidos con los cuatro desvíos a los rumbos cardinales, fueron :

A	B	C	D	E	F	G	K
-1,111	-12,158	18,607	1,248	-0,378	-0,355	0,354	0,264

Tabla 27. Coeficientes A,...,K de la aguja que se instaló en el buque ORTZE. Fuente: Propia.

\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E
-0,847	-11,804	18,962	-0,378

Tabla 28. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E de la aguja que se instaló en el buque ORTZE. Fuente: Propia.

En este caso, todas las curvas son prácticamente iguales, con independencia del desvío cuadrantal que se considere (*vide* Figura 101). Sin embargo, la curva correspondiente al NE se desajusta ligeramente, lo cual es conforme al resultado del epígrafe IV.3.2, ya que F y G tienen diferente signo.

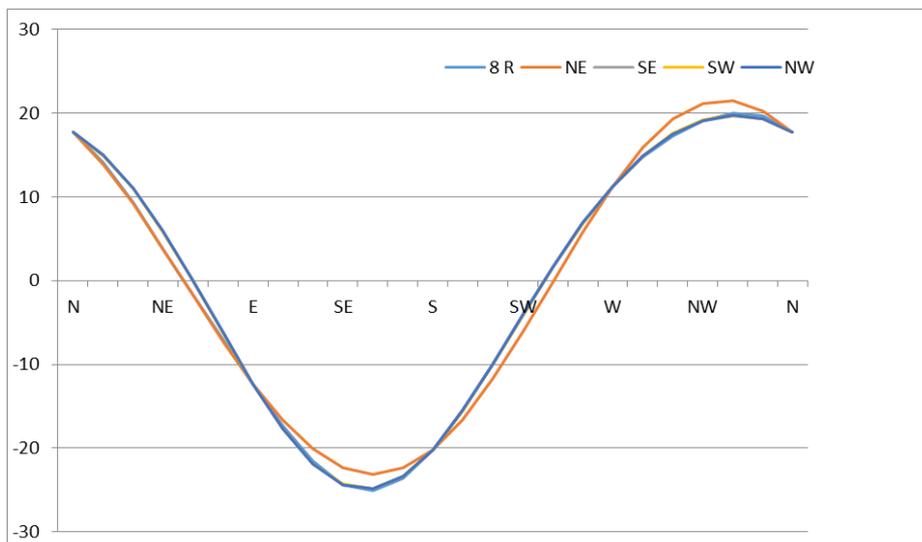


Figura 101. Desvíos de la aguja que se instaló en el buque ORTZE, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.

Respecto de la aguja instalada en el buque VILLA DE PORTUGALETE, los datos fueron:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ	5,471	-5,429	7,269	24,469	8,969	-7,531	-7,029	-2,029

Tabla 29. Desvíos de la aguja que se instaló en el buque VILLA DE PORTUGALETE. Fuente: Propia.

A	B	C	D	E	F	G	K
3,02	8,63	-5,186	-8,85	3,55	1,481	3,437	0,65

Tabla 30. Coeficientes A,...,K de la aguja que se instaló en el buque VILLA DE PORTUGALETE. Fuente: Propia.

\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E
3,67	7,149	-1,749	3,55

Tabla 31. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E de la aguja que se instaló en el buque VILLA DE PORTUGALETE. Fuente: Propia.

Luego, según el desvío al rumbo cuadrantal que se considere, resultan las siguientes curvas:

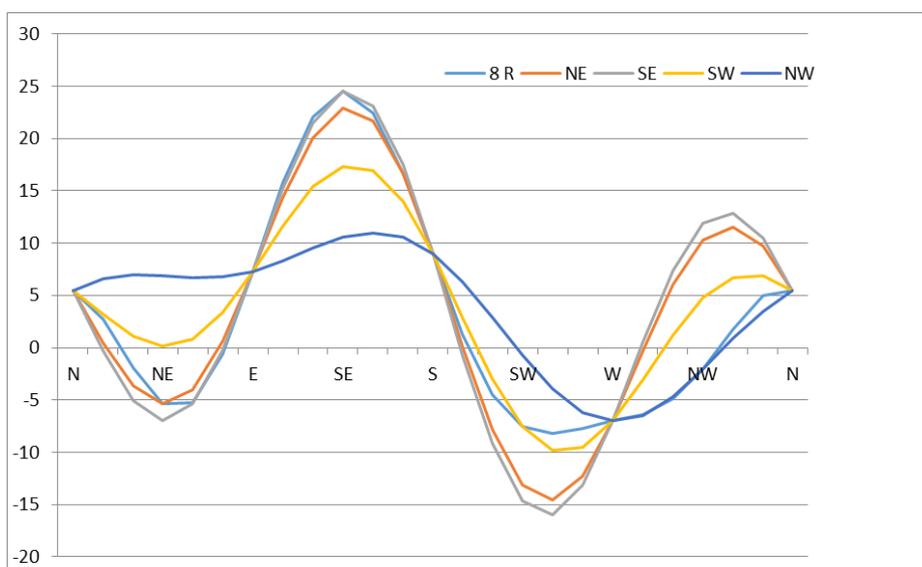


Figura 102. Desvíos de la aguja que se instaló en el buque VILLA DE PORTUGALETE, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.

De ellas, se desajusta la correspondiente al NW, lo cual también es conforme al resultado del epígrafe IV.3.2, ya que F y G tienen el mismo signo.

Finalmente, se exponen los datos obtenidos en las compensaciones efectuadas a tres catamaranes construidos en Astilleros Dalmau, en Arenys de Mar (Barcelona). El autor realizó estas compensaciones durante el último año de la tesis, y los buques fueron los siguientes: MUNDO MARINO ECO, FLY BLUE QUATTRO y FERRY AMAZONAS II.

Los datos del catamarán MUNDO MARINO ECO fueron:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ	-0,5	2,5	1,5	3,5	-1,5	-0,5	0,5	-0,5

Tabla 32. Desvíos residuales del buque MUNDO MARINO ECO. Fuente: Propia.

A	B	C	D	E	F	G	K
0,625	1,487	0,073	-0,25	-1	0,987	0,427	-0,625

Tabla 33. Coeficientes A,...,K residuales del buque MUNDO MARINO ECO. Fuente: Propia.

\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E
0	0,5	0,5	-1

Tabla 34. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del buque MUNDO MARINO ECO. Fuente: Propia.

Obteniendo las siguientes curvas:

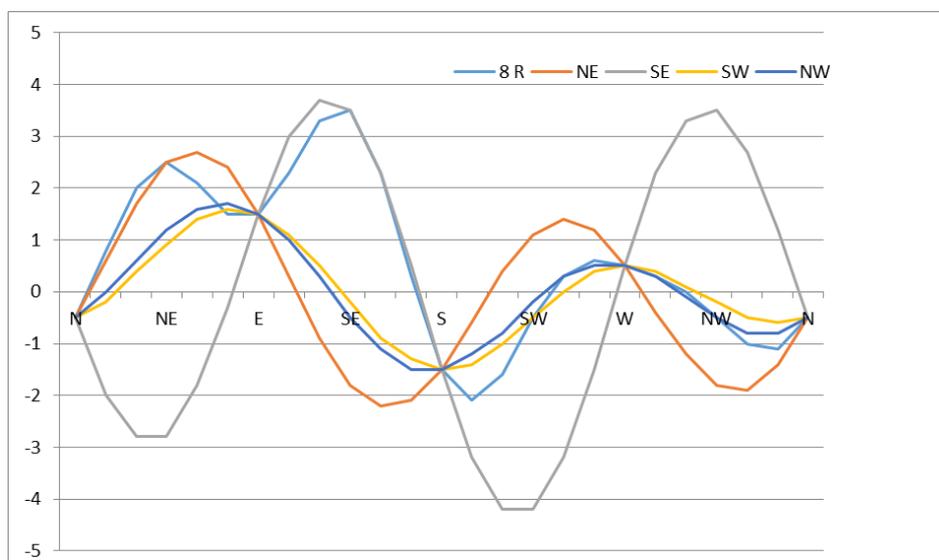


Figura 103. Desvíos residuales del buque MUNDO MARINO ECO, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.

Se desajusta la curva correspondiente al SE, y F y G tienen el mismo signo, lo cual es coherente con el resultado del epígrafe IV.3.2.

Los datos del catamarán FLY BLUE QUATTRO fueron:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ	0,5	1,5	-0,5	0,5	-0,5	-2,5	0,5	0,5

Tabla 35. Desvíos residuales del buque FLY BLUE QUATTRO. Fuente: Propia.

A	B	C	D	E	F	G	K
0	0,457	0,957	-0,5	0	0,957	-0,457	0

Tabla 36. Coeficientes A,...,K residuales del buque FLY BLUE QUATTRO. Fuente: Propia.

\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E
0	-0,5	0,5	0

Tabla 37. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del buque FLY BLUE QUATTRO. Fuente: Propia.

Obteniendo las siguientes curvas:

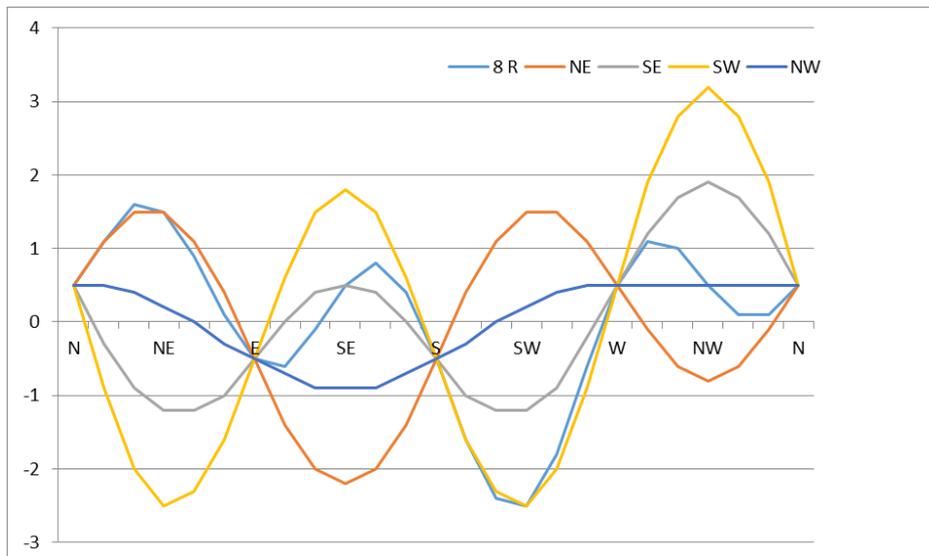


Figura 104. Desvíos residuales del buque FLY BLUE QUATTRO, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.

Tanto la curva correspondiente al NE, como la correspondiente al SW, se desajustan; aunque lo hace de manera más significativa la del SW. En cualquier caso, de acuerdo con el resultado del epígrafe IV.3.2, los coeficientes F y G deben tener distinto signo, como así es (F positivo y G negativo).

Los datos del catamarán FERRY AMAZONAS II fueron:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ	1,5	3,5	-0,5	-3	-0,5	-2,5	-3	0,5

Tabla 38. Desvíos residuales del buque FERRY AMAZONAS II. Fuente: Propia.

A	B	C	D	E	F	G	K
-0,5	1,067	2,179	0,875	1,125	-0,183	-1,179	-0,125

Tabla 39. Coeficientes A,...,K residuales del buque FERRY AMAZONAS II. Fuente: Propia.

\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E
-0,625	1,25	1	1,125

Tabla 40. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del buque FERRY AMAZONAS II. Fuente: Propia.

Obteniendo las siguientes curvas:

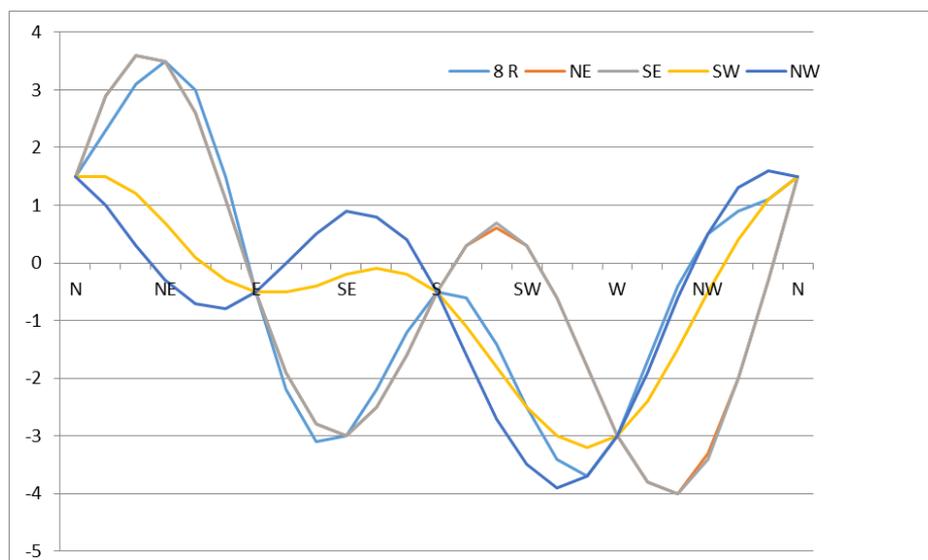


Figura 105. Desvíos residuales del buque FERRY AMAZONAS II, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.

Las curvas correspondientes al NE y al SE son prácticamente iguales. Asimismo, las curvas del SW y del NW son parecidas, pero la del NW difiere más de las otras. Por tanto, la curva que se desajusta es la del NW, con lo cual, de acuerdo con el resultado del epígrafe IV.3.2, los coeficientes F y G deben tener el mismo signo, como así es (ambos negativos).

METODOLOGÍA

Se ha procurado que: con un número reducido de datos, se obtuviera un muestreo suficientemente amplio. De los nueve casos expuestos, dos corresponden a agujas sin compensar (Ortze y Villa de Portugaleta); dos compensaciones fueron realizadas por el profesor Martínez-Lozares, codirector de esta tesis (Höegh Jacsonville y Allure of the Seas); dos, por otro compensador (Talitha y Mailyn IV), y tres, por el autor durante el último año de la tesis (Mundo Marino Eco, Fly Blue Quattro y Ferry Amazonas II). Con esto, se han considerado:

- 1.-Los desvíos residuales de agujas compensadas (la mayoría: 7), pero también los desvíos de agujas sin compensar (2).
- 2.-Los datos obtenidos por varios compensadores (3).
- 3.-Los datos de buques existentes (que ya habían sido compensados anteriormente o que no estaban compensados: 6) y de buques nuevos (los construidos en el Astilleros Dalmau: 3).
- 4.-Datos obtenidos hace más de cinco años (6) y datos obtenidos durante el último año (3).
- 5.-Datos obtenidos en diferentes tipos de buques, compases y bitácoras.

Asimismo, los datos que no fueron obtenidos por el autor, se han extraído de tres trabajos: una tesis doctoral, un TFM y un TFG.

CONCLUSIÓN

El resultado obtenido en el epígrafe IV.3.2 se cumple en todos los casos.

IV.3.4. Determinación del signo de los coeficientes F y G, conociendo únicamente los desvíos a los rumbos cardinales, como solución definitiva a la problemática del quinto rumbo

En los ejemplos expuestos en el epígrafe IV.3.3, se conocían los desvíos a los ocho rumbos principales. No obstante, si solo se toman los desvíos a los cuatro cardinales, y se pretende arrumar a un solo cuadrantal para determinar el coeficiente D, es necesario conocer el signo de los coeficientes F y G a partir de los desvíos a los rumbos cardinales, con el objetivo de determinar cuáles pueden ser los rumbos cuadrantales erróneos, a fin de no arrumar a ellos.

Tomando las expresiones de F y G en función de los coeficientes exactos, y desarrollando, resulta que:

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{1}{2}(\delta \cdot \beta - \varepsilon \cdot \gamma) \cdot \csc 1^\circ \\ G &= \frac{1}{2}(\delta \cdot \gamma + \varepsilon \cdot \beta) \cdot \csc 1^\circ \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} F \cdot \gamma &= \frac{1}{2}(\delta \cdot \beta \cdot \gamma - \varepsilon \cdot \gamma^2) \cdot \csc 1^\circ \\ G \cdot \beta &= \frac{1}{2}(\delta \cdot \beta \cdot \gamma + \varepsilon \cdot \beta^2) \cdot \csc 1^\circ \end{aligned} \right\} \Rightarrow G \cdot \beta - F \cdot \gamma = \frac{1}{2} \varepsilon \cdot (\beta^2 + \gamma^2) \cdot \csc 1^\circ$$

Y sustituyendo los coeficientes exactos por los senos de los aproximados de la fórmula práctica, se tiene:

$$\begin{aligned} G \cdot \sin \bar{B} - F \cdot \sin \bar{C} &= \frac{1}{2} \sin E \cdot (\sin^2 \bar{B} + \sin^2 \bar{C}) \cdot \csc 1^\circ \\ G \cdot \bar{B} \cdot \sin 1^\circ - F \cdot \bar{C} \cdot \sin 1^\circ &= \frac{1}{2} E \cdot \sin 1^\circ \cdot (\bar{B}^2 \cdot \sin^2 1^\circ + \bar{C}^2 \cdot \sin^2 1^\circ) \cdot \csc 1^\circ \\ G \cdot \bar{B} - F \cdot \bar{C} &= \frac{1}{2} E \cdot (\bar{B}^2 + \bar{C}^2) \cdot \sin 1^\circ \end{aligned}$$

Al tratarse de coeficientes residuales, los términos $G \cdot \bar{B}$, $F \cdot \bar{C}$, $E \cdot (\bar{B}^2 + \bar{C}^2)$ son del mismo orden, con lo cual, el término $\frac{1}{2} E \cdot (\bar{B}^2 + \bar{C}^2) \cdot \sin 1^\circ$ es despreciable con respecto a $G \cdot \bar{B}$, $F \cdot \bar{C}$. Por tanto,

$$G \cdot \bar{B} - F \cdot \bar{C} = 0 \Rightarrow G \cdot \bar{B} = F \cdot \bar{C} \Rightarrow \frac{\bar{B}}{\bar{C}} = \frac{F}{G}$$

De esta última expresión, se desprende que: F y G tiene el mismo o diferente signo según \bar{B} y \bar{C} tengan también el mismo o diferente signo. Así pues, *a priori*, este resultado da la respuesta definitiva a la problemática del quinto rumbo.

Comparando la tabla de los ocho desvíos A, ..., K con la de los cinco desvíos \bar{A} , ..., E de cada buque resulta que:

Cumplen la condición de signos: Talitha, Ortze, Mundo Marino Eco, Fly Blue Quattro, Ferry Amazonas II (cinco buques).

No cumplen la condición de signos: Maily IV, Villa de Portugaleta (dos buques).

En el caso de los buques Höegh Jacksonville y Allure of the Seas, no figuran estas tablas. Sin embargo, en el primero de ellos, F y G tienen el mismo signo, y en el segundo, diferente.

Asimismo, los coeficientes \bar{B} y \bar{C} en estos buques son:

Höegh Jacksonville: $\bar{B} = \frac{1}{2}(\Delta e - \Delta w) = \frac{1}{2}(1 - 1) = 0$; $\bar{C} = \frac{1}{2}(\Delta n - \Delta s) = \frac{1}{2}(1 - 1) = 0$

Allure of the Seas: $\bar{B} = \frac{1}{2}(\Delta e - \Delta w) = \frac{1}{2}(-1 - 0,5) = -0,75$; $\bar{C} = \frac{1}{2}(\Delta n - \Delta s) = \frac{1}{2}(1 - 2) = -0,5$

En consecuencia, el primero cumple la condición de signos; pero el segundo, no.

CONCLUSIÓN

De los nueve casos analizados, seis cumplen la condición (66,67 %), y tres, no (33,33 %). Así pues, no se puede determinar el rumbo cuadrantal erróneo conociendo únicamente los desvíos a los rumbos cardinales, y por tanto, no es fiable confeccionar la tablilla de los desvíos residuales con un borneo a los cuatro rumbos cardinales y a un solo cuadrantal.

IV.3.5. Discusión de los resultados

En el epígrafe IV.3.2, se ha demostrado que la problemática del quinto rumbo se debe a la incidencia del desvío sextantal (coeficientes F y G) en la ecuación completa del desvío. Este resultado se ha verificado en el epígrafe IV.3.3, y por tanto, es concluyente.

En el epígrafe IV.3.4, se han relacionado los coeficientes del desvío semicircular (B, C) con los del desvíos sextantal (F, G). La relación obtenida se basa en los coeficientes exactos, los cuales dependen de los imanes y de las varillas. El hecho de que no se cumpla, se puede atribuir a uno o varios pequeños errores al tomar los desvíos.

Estos errores pueden ser de medio grado, y su causa, pequeñas y rápidas guiñadas. Así por ejemplo, si la presión lateral de la hélice hace caer el buque a babor, el timonel tiene que ir corrigiendo a estribor, pero el valor medio de la oscilación que sufren los compases no es el rumbo que se lleva, ya que la variación de rumbo es casi siempre a babor. Y lo mismo ocurre cuando hay viento y el buque orza. Asimismo, a un determinado rumbo, los efectos de la hélice y del viento se pueden contrarrestar, mientras que al rumbo opuesto, se pueden sumar, de manera que: a un rumbo no hay error; pero a su opuesto, sí. Además, estas pequeñas y rápidas variaciones de rumbo se pueden percibir con retraso en el compás magnético.

En cualquier caso, si se toman los ocho desvíos a los rumbos principales, se obtienen los coeficientes A,...,K de la ecuación del desvío. Los errores introducidos no afectan a la incidencia del desvío sextantal sobre el conjunto de la serie de Fourier (ecuación del desvío), y por tanto, el rumbo cuadrantal que se desajusta cumple con el resultado del epígrafe IV.3.2. No obstante, estos errores sí pueden alterar ligeramente la correspondencia entre los coeficientes y los elementos magnéticos (imanes y varillas) de los que dependen, y como consecuencia, verse alterada la relación entre los coeficientes, tal como se muestra a continuación.

El resultado obtenido en el epígrafe IV.3.4 se basa en la siguiente aproximación:

$$G \cdot \bar{B} - F \cdot \bar{C} = \frac{1}{2} E \cdot (\bar{B}^2 + \bar{C}^2) \cdot \sin 1^\circ \approx 0$$

Considerando un caso bastante crítico, en el que cada uno de los coeficientes \bar{B} , \bar{C} , E tuviera el valor de $1,5^\circ$, el error cometido sería:

$$\text{Error} = \frac{1}{2} E \cdot (\bar{B}^2 + \bar{C}^2) \cdot \sin 1^\circ = \frac{1}{2} \cdot 1,5 \cdot (1,5^2 + 1,5^2) \cdot \frac{1}{57,3} \cong 0,059$$

Ahora bien: simplemente con un error de medio grado en el desvío al norte, el cual se traduce en un error de $\frac{1}{4}$ de grado en coeficiente \bar{C} , se tiene:

$$G \cdot \bar{B} - F \cdot (\bar{C} \pm \frac{1}{4}) = 0 \Rightarrow G \cdot \bar{B} - F \cdot \bar{C} \pm \frac{1}{4} F = 0 \Rightarrow G \cdot \bar{B} - F \cdot \bar{C} = \pm \frac{1}{4} F$$

De manera que, con un $F = 0,5$, el error es el doble que en caso crítico anterior:

$$\text{Error} = \frac{1}{4} F = \frac{1}{4} \cdot 0,5 = 0,125$$

Con este ejemplo, se observa la *fragilidad* del criterio obtenido en el epígrafe IV.3.4 ante la incidencia de pequeños errores, y por tanto, se pone de manifiesto la necesidad de obtener el coeficiente D con más de un desvío a los rumbos cuadrantales.

En este sentido, se señalan algunas conclusiones del TFG de Guerra (Guerra, 2020, pp. 98-99):

1.-*Ajustando la gráfica al valor del desvío a un rumbo cuadrantal, se pueden producir severos cambios en la curva, de manera que se obtengan desvíos a los otros rumbos cuadrantales muy diferentes a los desvíos iniciales.*

2.-*Considerando el coeficiente D medio [los coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E y el D obtenido con los cuatro desvíos a los rumbos cuadrantales], los rumbos cuadrantales no coinciden, pero los errores se minimizan. [...] en ninguna gráfica, coincide el desvío residual calculado con el desvío inicial de los desvíos cuadrantales. Sin embargo, no se obtienen desvíos notablemente diferentes a los iniciales. Asimismo, la amplitud de estas gráficas es menor que las otras, lo que indica que minimiza los posibles errores. (vide Figuras 106–112)*

3.-*Considerando los desvíos sextantal y octantal, la curva no queda bien modulada. [...] El hecho de que estas gráficas no queden bien moduladas, lo atribuimos a pequeños errores [...]. Si bien estos errores son pequeños, menores de $0,5^\circ$, porcentualmente son grandes, puesto que los desvíos residuales no suelen superar los 3° . En definitiva, aunque todos los desvíos calculados coinciden con los desvíos iniciales, no creemos que sea la curva más adecuada para anexar al certificado de compensación. (vide Figuras 106–112)*

Por tanto, la curva de desvíos residuales que mejor refleja el comportamiento de la aguja es la obtenida mediante la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (obtenido a partir de los cuatro rumbos cuadrantales). Asimismo, como solución intermedia entre este resultado y el intento de tomar un solo desvío a los rumbos cuadrantales para obtener el coeficiente D, se plantea la posibilidad de determinar dicho coeficiente con una exactitud aceptable y considerando dos desvíos a rumbos cuadrantales.

A modo de ilustración de lo indicado en los puntos 2 y 3 anteriores, las Figuras 106–112 muestran las curvas de los desvíos residuales de los buques analizados en el epígrafe IV.3.4, a excepción del Ortze y del Villa de Portugalete, ya que sus agujas no estaban compensadas.

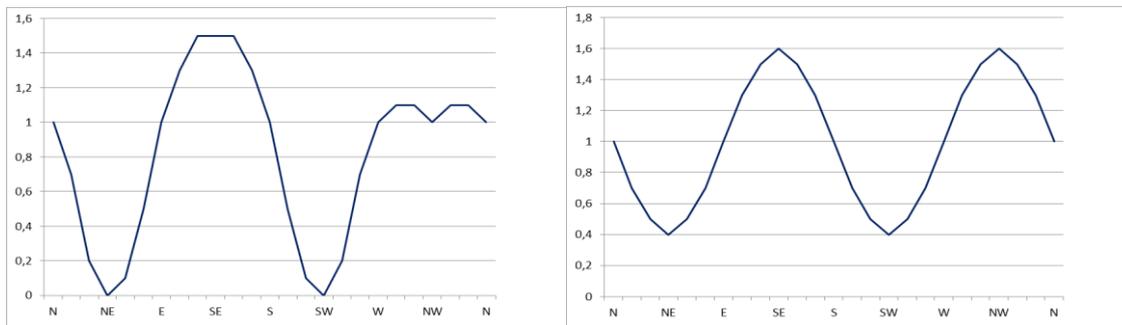


Figura 106. Desvíos residuales del buque HÖEGH JACSONVILLE, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.

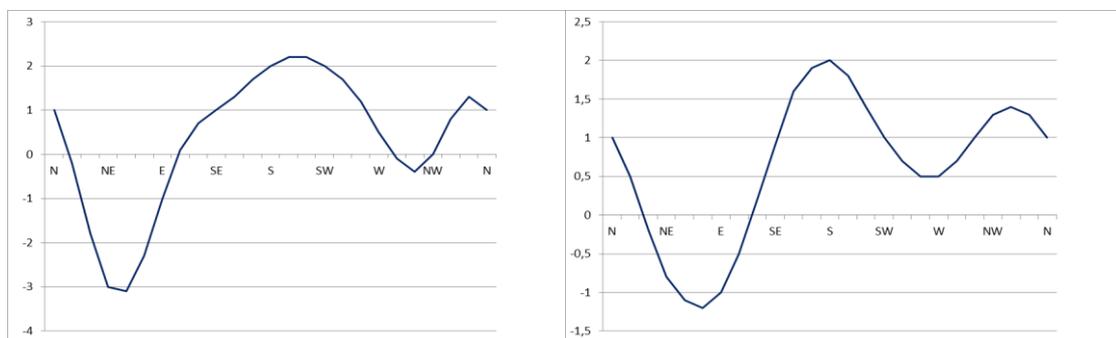


Figura 107. Desvíos residuales del buque ALLURE OF THE SEAS, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.

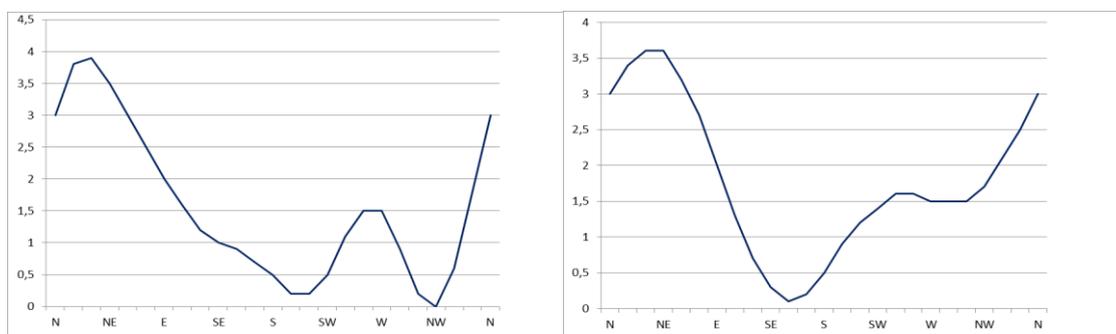


Figura 108. Desvíos residuales del buque TALITHA, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.

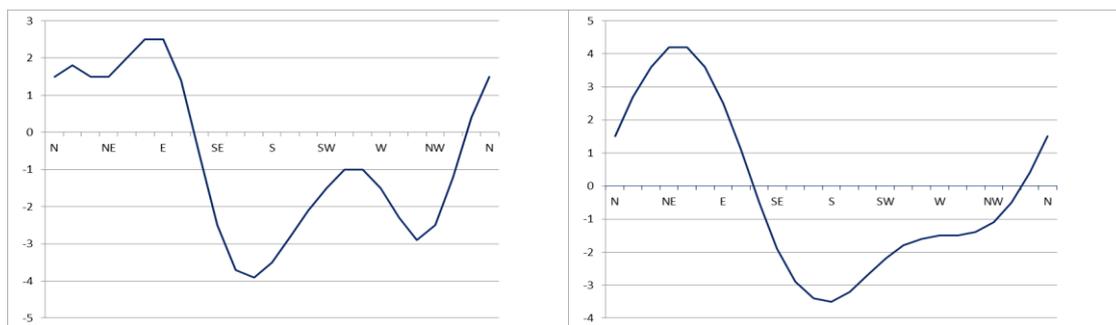


Figura 109. Desvíos residuales del buque MAILYN IV, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.

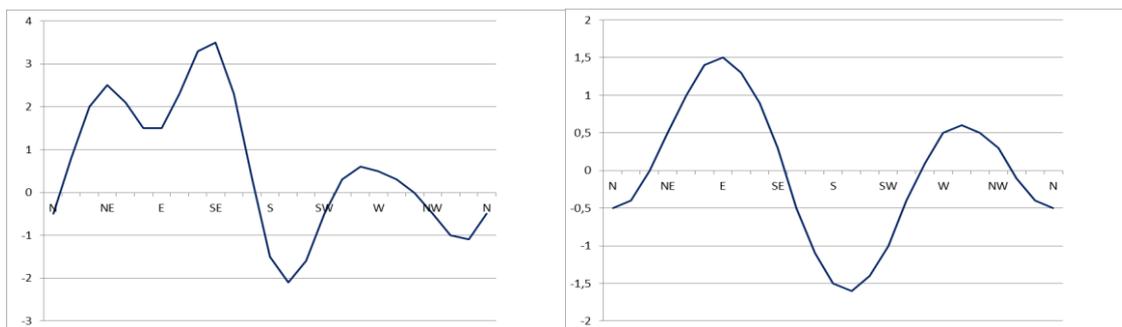


Figura 110. Desvíos residuales del buque MUNDO MARINO ECO, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.

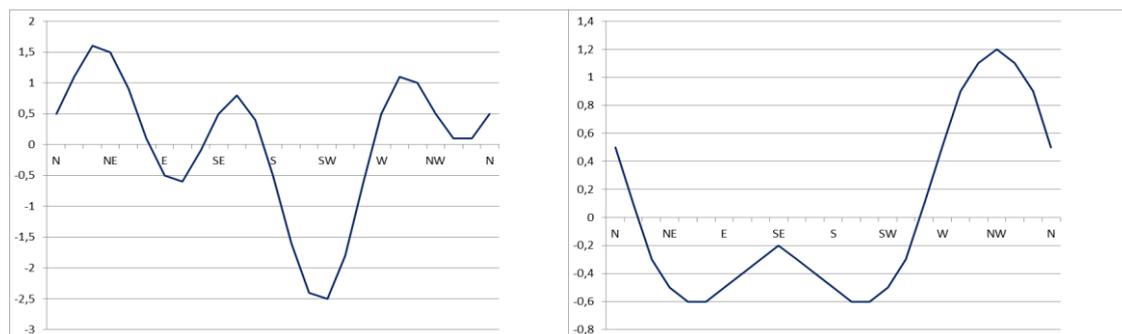


Figura 111. Desvíos residuales del buque FLY BLUE QUATTRO, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.

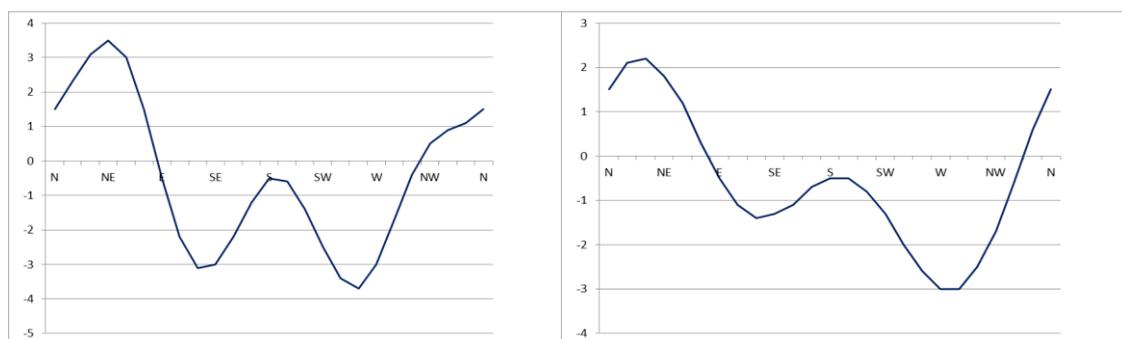


Figura 112. Desvíos residuales del buque FERRY AMAZONAS II, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.

IV.3.6. Obtención del coeficiente D a partir de los desvíos a dos rumbos cuadrantales

De acuerdo con la ecuación aproximada que tiene en cuenta los desvíos sextantal y octantal,

$$\Delta = \bar{A} - K + \bar{B} \cdot \sin R' + F \cdot \sin R' + \bar{C} \cdot \cos R' - G \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + K \cdot \cos 4R'$$

Si se siguen dos rumbos cuadrantales separados 90°, como por ejemplo el NE y el SE, se tiene:

$$\Delta_{ne} = \bar{A} - K + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta_{se} = \bar{A} - K + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta_{ne} - \Delta_{se} = \bar{C} \cdot \sqrt{2} - G \cdot \sqrt{2} + 2D - G \cdot \sqrt{2} \Rightarrow D = \frac{1}{2}(\Delta_{ne} - \Delta_{se}) - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \sqrt{2}$$

Pero si se arrumba al NE y al NW, resulta que:

$$\Delta_{ne} = \bar{A} - K + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta_{nw} = \bar{A} - K - \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta_{ne} - \Delta_{nw} = \bar{B} \cdot \sqrt{2} + F \cdot \sqrt{2} + 2D + F \cdot \sqrt{2} \Rightarrow D = \frac{1}{2}(\Delta_{ne} - \Delta_{nw}) - \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - F \cdot \sqrt{2}$$

Así pues, en unos casos, intervienen \bar{B} y F, y en otros, \bar{C} y G. Además, los coeficientes F y G no se pueden obtener solo con los desvíos a los rumbos cardinales, y por tanto, no se puede calcular D.

No obstante, si se siguen dos rumbos cuadrantales opuestos, como por ejemplo el NE y el SW, se obtiene que:

$$\Delta_{ne} = \bar{A} - K + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta_{sw} = \bar{A} - K - \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta_{ne} + \Delta_{sw} = 2\bar{A} - 2K + 2D - 2K \Rightarrow D = \frac{1}{2}(\Delta_{ne} + \Delta_{sw}) - \bar{A} + 2K$$

Y si se arrumba al SE y al NW,

$$\Delta_{se} = \bar{A} - K + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta_{nw} = \bar{A} - K - \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta_{se} + \Delta_{nw} = 2\bar{A} - 2K - 2D - 2K \Rightarrow D = -\frac{1}{2}(\Delta_{se} + \Delta_{nw}) + \bar{A} - 2K$$

Este resultado es más *estable* que el anterior (con rumbos separados 90°), ya que con este, D siempre depende de los desvíos a los rumbos opuestos y de los coeficientes A y K. Pero además, se puede relacionar con la problemática del quinto rumbo, como se expone a continuación.

En la hipótesis planteada, se asume que cualquiera de los tres rumbos que no sea el erróneo, es adecuado para obtener el coeficiente D. Asimismo, cuando se tienen los desvíos a los cuatro rumbos cuadrantales y se estudia cuál escoger, también se acaba confeccionando la tablilla de los desvíos a partir del desvío a un solo cuadrantal. Esto implica que: muchas veces, hay un pequeño error en el cálculo del coeficiente D, pues el coeficiente obtenido con un determinado rumbo cuadrantal, no tiene por que coincidir con el coeficiente medio (calculado con los cuatro cuadrantales). Sin embargo, este error no se tiene en cuenta.

Sea η el error medio cuando se considera la fórmula práctica del desvío a los rumbos cuadrantales, el cual se puede obviar, y sea ξ el error máximo cometido, el cual tiene un valor apreciable. Suponiendo que el rumbo al que se produce el error máximo sea el NE, se puede considerar que:

$$\Delta_{ne} = \bar{A} + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + \xi$$

$$\Delta_{se} = \bar{A} + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + \eta$$

$$\begin{aligned}\Delta_{sw} &= \bar{A} - \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + 2\eta - \xi \\ \Delta_{nw} &= \bar{A} - \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + \eta\end{aligned}$$

Con lo cual,

$$D = \frac{1}{4}(\Delta_{ne} + \Delta_{sw} - \Delta_{se} - \Delta_{nw}) \quad D = \frac{1}{2}(\Delta_{ne} + \Delta_{sw}) - \bar{A} - \eta \quad D = -\frac{1}{2}(\Delta_{se} + \Delta_{nw}) + \bar{A} + \eta$$

Comparando estos resultados con las expresiones obtenidas anteriormente, se tiene:

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{1}{2}(\Delta_{ne} + \Delta_{sw}) - \bar{A} + 2K \\ D &= \frac{1}{2}(\Delta_{ne} + \Delta_{sw}) - \bar{A} + \eta \end{aligned} \right\} \Rightarrow \eta = 2K \quad \left. \begin{aligned} D &= -\frac{1}{2}(\Delta_{se} + \Delta_{nw}) + \bar{A} - 2K \\ D &= -\frac{1}{2}(\Delta_{se} + \Delta_{nw}) + \bar{A} + \eta \end{aligned} \right\} \Rightarrow \eta = 2K$$

Pero por cuanto η se puede obviar, lo mismo ocurre con el término $2K$, de modo que:

$$D = \frac{1}{2}(\Delta_{ne} + \Delta_{sw}) - \bar{A} = -\frac{1}{2}(\Delta_{se} + \Delta_{nw}) + \bar{A}$$

No obstante, si se toman los desvíos a dos rumbos separados 90° , como por ejemplo el SE y el SW, resulta que:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{se} &= \bar{A} + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + \eta \\ \Delta_{sw} &= \bar{A} - \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + 2\eta - \xi \end{aligned} \right\} \Rightarrow D = \frac{1}{2}(\Delta_{sw} - \Delta_{se}) + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{1}{2}\eta + \frac{1}{2}\xi$$

Además,

$$\Delta_{sw} = \bar{A} - K - \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D - F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta_{se} = \bar{A} - K + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + G \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - K$$

$$\Delta_{sw} - \Delta_{se} = -\bar{B} \cdot \sqrt{2} - F \cdot \sqrt{2} + 2D - F \cdot \sqrt{2} \Rightarrow D = \frac{1}{2}(\Delta_{sw} - \Delta_{se}) + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + F \cdot \sqrt{2}$$

Comparando ambas expresiones de D en función de los desvíos al SE y al SW, se obtiene que:

$$-\frac{1}{2}\eta + \frac{1}{2}\xi = F \cdot \sqrt{2} \Rightarrow \xi = F \cdot 2\sqrt{2} + \eta = F \cdot 2\sqrt{2} - 2K$$

Por consiguiente, el error máximo (ξ) depende de uno de los coeficientes del desvío sextantal (F o G) y del coeficiente K del desvío octantal, mientras que el error medio (η) solo depende de K . Esto es coherente con el hecho de que ξ no se pueda obviar, por cuanto depende del desvío sextantal (que es el causante de la problemática del quinto rumbo), mientras que η se puede obviar, al no depender del desvío sextantal. Asimismo, si se toman los desvíos a dos rumbos separados 90° , aparece el error ξ , y por tanto, el resultado no es fiable; pero si se toman los desvíos a dos rumbos opuestos, el error ξ no aparece.

Con los datos aportados en el epígrafe IV.3.3, en la Tabla 41, se muestran los valores de D , según se considere:

$$D_1 = \frac{1}{2}(\Delta_{ne} + \Delta_{sw}) - \bar{A} \quad D_2 = -\frac{1}{2}(\Delta_{se} + \Delta_{nw}) + \bar{A}$$

$$D = \frac{1}{4}(\Delta_{ne} + \Delta_{sw} - \Delta_{se} - \Delta_{nw}) = \frac{1}{2}(D_1 + D_2)$$

Se indica la diferencia (en valor absoluto) entre D y los valores de D_1 y D_2 , la cual es $|\eta|$.

HÖEGH JACKSON- VILLE	NE	SE	SW	NW		$\frac{1}{2} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw})$	$\frac{1}{2} (\Delta_{se} + \Delta_{nw})$	$ \eta $
	0	1,5	0	1		0	1,25	0,375
	N	E	S	W	\bar{A}	D_1	D_2	D
	1	1	1	1	1	-1	-0,25	-0,625
ALLURE OF THE SEAS	NE	SE	SW	NW		$\frac{1}{2} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw})$	$\frac{1}{2} (\Delta_{se} + \Delta_{nw})$	$ \eta $
	-3	1	2	0		-0,5	0,5	0,625
	N	E	S	W	\bar{A}	D_1	D_2	D
	1	-1	2	0,5	0,625	-1,125	0,125	-0,5
TALITHA	NE	SE	SW	NW		$\frac{1}{2} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw})$	$\frac{1}{2} (\Delta_{se} + \Delta_{nw})$	$ \eta $
	3,5	1	0,5	0		2	0,5	0,5
	N	E	S	W	\bar{A}	D_1	D_2	D
	3	2	0,5	1,5	1,75	0,25	1,25	0,75
MAILYN IV	NE	SE	SW	NW		$\frac{1}{2} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw})$	$\frac{1}{2} (\Delta_{se} + \Delta_{nw})$	$ \eta $
	1,5	-2,5	-1,5	-2,5		0	-2,5	1
	N	E	S	W	\bar{A}	D_1	D_2	D
	1,5	2,5	-3,5	-1,5	-0,25	0,25	2,25	1,25
ORTZE	NE	SE	SW	NW		$\frac{1}{2} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw})$	$\frac{1}{2} (\Delta_{se} + \Delta_{nw})$	$ \eta $
	3,933	-24,381	-4,186	19,136		-0,1265	-2,6225	0,5295
	N	E	S	W	\bar{A}	D_1	D_2	D
	17,737	-12,272	-20,181	11,335	-0,845	0,7185	1,7775	1,248
VILLA DE PORTU- GALETE	NE	SE	SW	NW		$\frac{1}{2} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw})$	$\frac{1}{2} (\Delta_{se} + \Delta_{nw})$	$ \eta $
	-5,429	24,469	-7,531	-2,029		-6,48	11,22	1,3
	N	E	S	W	\bar{A}	D_1	D_2	D
	5,471	7,269	8,969	-7,029	3,67	-10,15	-7,55	-8,85
MUNDO MARINO ECO	NE	SE	SW	NW		$\frac{1}{2} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw})$	$\frac{1}{2} (\Delta_{se} + \Delta_{nw})$	$ \eta $
	2,5	3,5	-0,5	-0,5		1	1,5	1,25
	N	E	S	W	\bar{A}	D_1	D_2	D
	-0,5	1,5	-1,5	0,5	0	1	-1,5	-0,25
FLY BLUE QUATTRO	NE	SE	SW	NW		$\frac{1}{2} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw})$	$\frac{1}{2} (\Delta_{se} + \Delta_{nw})$	$ \eta $
	1,5	0,5	-2,5	0,5		-0,5	0,5	0
	N	E	S	W	\bar{A}	D_1	D_2	D
	0,5	-0,5	-0,5	0,5	0	-0,5	-0,5	-0,5
FERRY AMAZO- NAS II	NE	SE	SW	NW		$\frac{1}{2} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw})$	$\frac{1}{2} (\Delta_{se} + \Delta_{nw})$	$ \eta $
	3,5	-3	-2,5	0,5		0,5	-1,25	0,25
	N	E	S	W	\bar{A}	D_1	D_2	D
	1,5	-0,5	-0,5	-3	-0,625	1,125	0,625	0,875

Tabla 41. Valores del coeficiente D según los desvíos a los rumbos cuadrantales opuestos que se consideren, y sus diferencias con el coeficiente D medio. Fuente: Propia.

Se observa que el valor máximo de $|\eta|$ que se ha obtenido es de $1,3^\circ$, y su valor medio, de $0,6477^\circ$, aproximadamente, $2/3$ de grado. También se observa que $\eta = 2K$ (los coeficientes K figuran en las Tablas 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39). Luego, si bien el error medio ($|\eta|$) a los cuatro rumbos cuadrantales no tiene un valor medio que se pueda obviar (como se había supuesto), tampoco tiene un valor excesivo, así como tampoco lo tiene el valor máximo obtenido.

En la Tabla 42, se comparan los valores del coeficiente D medio (D) con los valores de los coeficientes obtenidos únicamente con el desvío a un rumbo cuadrantal (Dne, Dse, Dsw, Dnw). Dif es la diferencia (en valor absoluto) entre estos coeficientes y el coeficiente D medio. También se considera D_1 , teniendo en cuenta que: $|D_1 - D| = |D_2 - D| = |\eta|$. Asimismo, en rojo, se indican los datos del rumbo erróneo, y en verde, los datos con $Dif < |\eta|$.

HÖEGH JACKSON- VILLE D = -0,625	NE	SE	SW	NW	Dne	Dse	Dsw	Dnw	D_1
	0	1,5	0	1	-1	-0,5	-1	0	-1
	\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif = $ \eta $
	1	0	0	0	0,375	0,125	0,375	0,625	0,375
ALLURE OF THE SEAS D = -0,5	NE	SE	SW	NW	Dne	Dse	Dsw	Dnw	D_1
	-3	1	2	0	-2,741	-0,552	0,491	0,802	-1,125
	\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif = $ \eta $
	0,625	-0,75	-0,5	0,875	2,241	0,052	0,991	1,302	0,625
TALITHA D = 0,75	NE	SE	SW	NW	Dne	Dse	Dsw	Dnw	D_1
	3,5	1	0,5	0	0,689	0,043	-0,189	2,457	0,25
	\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif = $ \eta $
	1,75	0,25	1,25	0	0,061	0,707	0,939	1,707	0,5
MAILYN IV D = 1,25	NE	SE	SW	NW	Dne	Dse	Dsw	Dnw	D_1
	1,5	-2,5	-1,5	-2,5	-1,432	1,896	1,932	2,604	0,25
	\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif = $ \eta $
	-0,25	2	2,5	-0,75	2,682	0,646	0,682	1,354	1
ORTZE D = 1,248	NE	SE	SW	NW	Dne	Dse	Dsw	Dnw	D_1
	3,933	-24,38	-4,186	19,136	-0,282	1,780	1,722	1,772	0,7185
	\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif = $ \eta $
	-0,847	-11,80	18,962	-0,378	1,53	0,532	0,474	0,524	0,5295
VILLA DE PORTU- GALETE D = -8,85	NE	SE	SW	NW	Dne	Dse	Dsw	Dnw	D_1
	-5,429	24,469	-7,531	-2,029	-12,917	-14,507	-7,383	-0,593	-10,25
	\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif = $ \eta $
	3,67	7,149	-1,749	3,55	4,067	5,657	1,467	8,257	1,3
MUNDO MARINO ECO D = -0,25	NE	SE	SW	NW	Dne	Dse	Dsw	Dnw	D_1
	2,5	3,5	-0,5	-0,5	1,793	-3,5	0,207	0,5	1
	\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif = $ \eta $
	0	0,5	0,5	-1	2,043	3,25	0,457	0,75	1,25
FLY BLUE QUATTRO D = -0,5	NE	SE	SW	NW	Dne	Dse	Dsw	Dnw	D_1
	1,5	0,5	-2,5	0,5	1,5	-1,21	-2,5	0,21	-0,5
	\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif = $ \eta $
	0	-0,5	0,5	0	2	0,71	2	0,71	0
FERRY AMAZO- NAS II D = 0,875	NE	SE	SW	NW	Dne	Dse	Dsw	Dnw	D_1
	3,5	-3	-2,5	0,5	2,534	2,552	-0,284	-1,302	1,125
	\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E	Dif	Dif	Dif	Dif	Dif = $ \eta $
	-0,625	1,25	1	1,125	1,659	1,677	1,159	2,177	0,25

Tabla 42. Valores del coeficiente D según el desvío cuadrantal que se considere, y sus diferencias con el coeficiente D medio. Fuente: Propia.

Se observa que la mayor diferencia (Dif) corresponde siempre al rumbo erróneo, y que generalmente, los desvíos obtenidos con un solo rumbo cuadrantal tienen una diferencia superior a $|\eta|$. Sin considerar el dato del rumbo erróneo, cada buque tiene tres desvíos cuadrantales mediante los cuales es adecuado calcular el coeficiente D. Por tanto, en total, hay veintisiete desvíos. De ellos, solo nueve (33,33 %) tienen una diferencia inferior a $|\eta|$, y de estos, dos son prácticamente iguales a $|\eta|$ (buque Ortze). Por tanto, solo siete desvíos (25,94 %) tienen una diferencia real inferior a $|\eta|$. Además, la máximas diferencias entre los nueve desvíos y $|\eta|$ son:

Höegh Jacksonville: $0,375 - 0,125 = 0,25$

Allure of the Seas: $0,625 - 0,052 = 0,573$

Talitha: $0,5 - 0,061 = 0,439$

Mailyn IV: $1 - 0,646 = 0,354$; $1 - 0,682 = 0,318$

Ortze: $0,5295 - 0,474 = 0,0555$; $0,5295 - 0,524 = 0,0055$

Mundo Marino Eco: $1,25 - 0,457 = 0,793$; $1,25 - 0,75 = 0,5$

La media de estas nueve diferencias es de $0,3653^\circ$, aproximadamente, $1/3$ de grado. Sin considerar los datos del buque Ortze, la media de las otras siete diferencias es de $0,461^\circ$, aprox., $1/2$ grado. Asimismo, la máxima diferencia es de $0,793^\circ$, aprox., $3/4$ de grado.

CONCLUSIÓN

No se puede determinar correctamente el coeficiente D si únicamente se ha tomado el desvío a un rumbo cuadrantal, ya que no se puede garantizar que dicho rumbo no sea el erróneo. Asimismo, tampoco es adecuado calcularlo con los desvíos a dos rumbos cuadrantales separados 90° . Por tanto, no se puede confeccionar, de forma fiable, la tablilla de los desvíos residuales con los cuatro rumbos cardinales y: un solo rumbo cuadrantal o dos cuadrantales separados 90° . No obstante, a la vista de los resultados obtenidos (reflejados en las Tablas 41 y 42) y teniendo en cuenta que se considera aceptable la confección de la tablilla de los desvíos residuales a partir de los desvíos a los cuatro rumbos cardinales y a un cuadrantal que no sea el erróneo, también se debe considerar aceptable la confección de la tablilla con los cuatro rumbos cardinales y dos cuadrantales opuestos, aunque uno de ellos sea el rumbo erróneo.

IV.4. Método para compensar y confeccionar la tablilla de los desvíos residuales con un solo borneo a cuatro rumbos magnéticos

IV.4.1. Planteamiento del método: aplicación de los resultados de los capítulos IV.2 y IV.3

En el epígrafe IV.2.2, se expuso la compensación reducida, la cual solo requiere que se actúe sobre los imanes a dos rumbos cardinales separados 90° , y sobre las esferas (o dispositivos análogos), a un rumbo cuadrantal. Asimismo, a lo largo del capítulo IV.3, se ha constatado que: para determinar adecuadamente el coeficiente D residual, es necesario tomar los desvíos, por lo menos, a dos rumbos cuadrantales, los cuales deben estar separados 180° (epígrafe IV.3.6).

Por consiguiente, se puede realizar una compensación de la siguiente forma: se sigue un rumbo cardinal (p. ej. el E) y se anula el desvío; se arrumba a otro cardinal separado 90° de este (p. ej. el N) y se anula el desvío; se arrumba a un cuadrantal (p. ej. al NE) y se anula el desvío; se arrumba a los dos cardinales restantes (al W y al S en el ejemplo) y se toman los desvíos (sin actuar sobre los imanes), y finalmente, se arrumba al opuesto del primer cardinal (al SW en el ejemplo) y se toma el desvío (sin actuar sobre las esferas o dispositivos análogos). Con los cuatro desvíos a los rumbos cardinales, se obtienen los coeficientes A, B, C, E, y con los dos desvíos a los rumbos cuadrantales y el coeficiente A, se obtiene el D.

De acuerdo con la Norma ISO 25862, si ninguno de los desvíos residuales calculados es mayor que 3° (para buques de 82,5 m de eslora o más) o 4° (para buques de eslora inferior a 82,5 m), la compensación es correcta.

En caso de no ser así, se debería actuar sobre los correctores que afectan al mayor de los coeficientes B, C o D. Esto supondría: o bien actuar sobre los imanes a uno de los dos rumbos cardinales a los que no se eliminó el desvío (W o S en el ejemplo), anulando ahora la mitad del desvío, de acuerdo con lo expuesto en los epígrafes II.4.4 y IV.2.3, o bien actuar sobre las esferas a un rumbo cardinal separado 90° del que se eliminó el desvío, anulando también la mitad del desvío a este nuevo rumbo, según lo indicado en el epígrafe II.4.8. El reajuste de las esferas no es muy habitual, excepto si se trata de la primera compensación. No obstante, en tal caso, se debería arrumbar, por lo menos, al cuadrantal opuesto del que se anuló la mitad del desvío, a fin de tomar el desvío a este nuevo rumbo cuadrantal, y determinar adecuadamente el nuevo coeficiente D residual, conforme al resultado del epígrafe IV.3.6. Asimismo, de acuerdo con el resultado del epígrafe IV.2.6, si se tiene que actuar por segunda vez sobre los imanes longitudinales o transversales (más habitual que tener que actuar sobre las esferas), no es necesario prolongar el borneo para obtener el nuevo coeficiente B o C respectivamente.

En cualquier caso, las esferas siempre tienen que estar colocadas antes de actuar sobre los imanes, y asimismo, si se dispone de barra Flinders, esta tiene que estar instalada antes de

actuar sobre cualquier otro corrector, de conformidad con lo expuesto en el capítulo II.7. Si no se trata de la primera compensación, estos correctores ya están colocados; pero en la primera compensación de un buque, se deben instalar ambos en una posición intermedia, de manera que contrarresten los efectos secundarios descritos en el capítulo II.7. Dicha posición suele ser: las esferas a la mitad de su recorrido, y la barra Flinders con la mitad de su longitud. Además, la colocación previa de las esferas es un requisito para poder aplicar el resultado del epígrafe IV.2.6.

IV.4.2. Desarrollo del método: aplicación de la regla de Cramer y reducción de los rumbos a seguir en el borneo

En el epígrafe IV.2.5, se aplicó la regla de Cramer a la ecuación exacta del desvío, a fin de mejorar la exactitud de los desvíos residuales cuando, al compensar, no se siguen rumbos magnéticos coincidentes con los rumbos cardinales o cuadrantales, sino enfilaciones próximas a ellos. Pero la regla de Cramer se puede aplicar a cualquier aproximación de la ecuación del desvío, siempre y cuando se tengan el mismo número de coeficientes que de desvíos residuales; es decir: el mismo número de incógnitas (los coeficientes) que de ecuaciones (los desvíos obtenidos: casos particulares de la aproximación para cada uno de ellos). En consecuencia, se pueden determinar los coeficientes A, B, C, D, E de la fórmula práctica del desvío a partir de los desvíos tomados a dos rumbos cuadrantales opuestos (epígrafe IV.3.6) y los desvíos obtenidos a tres rumbos cardinales.

Para ello, sea R un rumbo magnético cardinal. Se sigue dicho rumbo, y se anula el desvío o se minimiza, siendo Δ_R el desvío residual. A continuación, se sigue el rumbo cardinal $R \pm 90^\circ$, y se anula el desvío o se minimiza, siendo $\Delta_{R\pm 90}$ el desvío residual. Igualmente, se va al rumbo cuadrantal $R \pm 45^\circ$, y se anula el desvío o se minimiza, siendo $\Delta_{R\pm 45}$ el desvío residual. Luego, se sigue el rumbo cardinal $R \pm 180^\circ = R + 180^\circ$, y se toma el desvío residual, siendo Δ_{R+180} . Y finalmente, se toma el desvío residual al rumbo cuadrantal $R \pm 45^\circ \pm 180^\circ = R \pm 225^\circ$, siendo $\Delta_{R\pm 225}$. Por tanto, los coeficientes A, B, C, D, E se pueden obtener mediante el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\begin{pmatrix} 1 & \sin R & \cos R & \sin 2R & \cos 2R \\ 1 & \sin(R \pm 90^\circ) & \cos(R \pm 90^\circ) & \sin 2(R \pm 90^\circ) & \cos 2(R \pm 90^\circ) \\ 1 & \sin(R + 180^\circ) & \cos(R + 180^\circ) & \sin 2(R + 180^\circ) & \cos 2(R + 180^\circ) \\ 1 & \sin(R \pm 45^\circ) & \cos(R \pm 45^\circ) & \sin 2(R \pm 45^\circ) & \cos 2(R \pm 45^\circ) \\ 1 & \sin(R \pm 225^\circ) & \cos(R \pm 225^\circ) & \sin 2(R \pm 225^\circ) & \cos 2(R \pm 225^\circ) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_R \\ \Delta_{R\pm 90} \\ \Delta_{R+180} \\ \Delta_{R\pm 45} \\ \Delta_{R\pm 225} \end{pmatrix}$$

Desarrollando las sumas de los senos y cosenos, y teniendo en cuenta que, por ser $R = 90^\circ \cdot k$ (donde k es un número entero), $\sin 2R = \sin 180^\circ \cdot k = 0$, resulta que:

$$\begin{pmatrix} 1 & \sin R & \cos R & 0 & \cos 2R \\ 1 & \pm \cos R & \mp \sin R & 0 & -\cos 2R \\ 1 & -\sin R & -\cos R & 0 & \cos 2R \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2}(\sin R \pm \cos R) & \frac{\sqrt{2}}{2}(\cos R \mp \sin R) & \pm \cos 2R & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2}(-\sin R \mp \cos R) & \frac{\sqrt{2}}{2}(-\cos R \pm \sin R) & \pm \cos 2R & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_R \\ \Delta_{R \pm 90} \\ \Delta_{R \pm 180} \\ \Delta_{R \pm 45} \\ \Delta_{R \pm 225} \end{pmatrix}$$

siendo $\sin R$, $\cos R = 0$ o ± 1 , y asimismo, $\cos 2R = \pm 1$.

No obstante, el número mínimo de rumbos a seguir, para efectuar una compensación correcta, es de cuatro: dos cardinales separados 90° para compensar el desvío semicircular, y dos cuadrantales separados 180° para compensar el desvío cuadrantal y determinar adecuadamente el coeficiente D residual. Por tanto, se puede considerar una aproximación de la ecuación del desvío con cuatro coeficientes, la cual tendrá una exactitud menor que la fórmula práctica, pero una exactitud mayor que la primera aproximación ($\Delta = B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R'$). Además, teniendo en cuenta que la compensación que se está planteando está basada en la compensación reducida, la cual asume que el efecto de las varillas d, b es poco notorio, los coeficientes de la fórmula práctica que se pueden obviar son el A o el E.

En cuanto a la confección de la tablilla de los desvíos residuales, en primer lugar, se debe asegurar que la pérdida de exactitud al considerar solo cuatro desvíos, no afecte a la precisión de rumbo requerida para los compases magnéticos, de conformidad con el apartado G1 de la Norma ISO 25862. De entrada, se asume que esto no será así, dado el escaso valor que generalmente tienen las varillas d, b. Por tanto, se deja su verificación para el epígrafe IV.4.6: *Verificación del método*. En segundo lugar, se trata de determinar cuál de los dos coeficientes que dependen de las varillas d, b, no se considera: si el A o el E. Es decir: cuál de las dos aproximaciones que se muestran a continuación es más conveniente tomar.

$$\Delta = A + B \cdot \sin 2R' + C \cdot \cos R' + \sin 2R' + D \cdot \sin 2R'$$

$$\Delta = B \cdot \sin 2R' + C \cdot \cos R' + \sin 2R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R'$$

Los sistemas de ecuaciones para las aproximaciones planteadas son:

$$\begin{pmatrix} 1 & \pm 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \pm 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm 1 \\ 1 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \mp \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_{e,w} \\ \Delta_{n,s} \\ \Delta_{ne,se} \\ \Delta_{sw,nw} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \pm 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & \pm 1 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm 1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \mp \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_{e,w} \\ \Delta_{n,s} \\ \Delta_{ne,se} \\ \Delta_{sw,nw} \end{pmatrix}$$

Los cuales, sumando la tercera fila de las matrices a la cuarta, se transforman en:

$$\text{Sistema 1: } \begin{pmatrix} 1 & \pm 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \pm 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm 1 \\ 2 & 0 & 0 & \pm 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_{e,w} \\ \Delta_{n,s} \\ \Delta_{ne,se} \\ \Delta_{ne,se} + \Delta_{sw,nw} \end{pmatrix}$$

$$\text{Sistema 2: } \begin{pmatrix} \pm 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & \pm 1 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm 1 & 0 \\ 0 & 0 & \pm 2 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{B} \\ \text{C} \\ \text{D} \\ \text{E} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta e, w \\ \Delta n, s \\ \Delta ne, se \\ \Delta ne, se + \Delta sw, nw \end{pmatrix}$$

IV.4.3. Primera discusión del método: análisis de los sistemas de ecuaciones planteados

Para que un sistema de ecuaciones tenga solución, el determinante de su matriz cuadrada no puede ser cero. En los sistemas planteados, los determinantes son:

Para el sistema 1,

$$\det M_1 = \begin{vmatrix} 1 & \pm 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \pm 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm 1 \\ 2 & 0 & 0 & \pm 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \sin(90^\circ, 270^\circ) & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cos(0^\circ, 180^\circ) & 0 \\ 1 & \sin(45^\circ, 135^\circ) & \cos(45^\circ, 135^\circ) & \sin(90^\circ, 270^\circ) \\ 2 & 0 & 0 & 2 \cdot \sin(90^\circ, 270^\circ) \end{vmatrix}$$

Para el sistema 2,

$$\det M_2 = \begin{vmatrix} \pm 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & \pm 1 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm \frac{\sqrt{2}}{2} & \pm 1 & 0 \\ 0 & 0 & \pm 2 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sin(90^\circ, 270^\circ) & 0 & 0 & -1 \\ 0 & \cos(0^\circ, 180^\circ) & 0 & 1 \\ \sin(45^\circ, 135^\circ) & \cos(45^\circ, 135^\circ) & \sin(90^\circ, 270^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cdot \sin(90^\circ, 270^\circ) & 0 \end{vmatrix}$$

Asimismo, las combinaciones de rumbos cardinales separados 90° son: E–N, E–S, W–N, W–S. Y para cada pareja de rumbos cardinales, los cuadrantales separados 180° pueden ser: NE–SW o SE–NW. Por tanto, hay ocho posibles casos.

Caso 1: cardinales E, N y cuadrantales NE, SW (un cuadrantal entre los dos cardinales)

$$\begin{aligned} \det M_1 &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = -\begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 2 \end{vmatrix} = \\ &= -\sqrt{2} - \sqrt{2} + 0 = -2\sqrt{2} \\ \det M_2 &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{vmatrix} = -2 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} = -2 \cdot \left(\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{vmatrix} \right) = -2 \cdot \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = 0 \end{aligned}$$

Caso 2: cardinales E, N y cuadrantales SE, NW (ningún cuadrantal entre los dos cardinales)

$$\begin{aligned} \det M_1 &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 2 & 0 & 0 & -2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 0 & 0 & -2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 2 & 0 & -2 \end{vmatrix} = -\begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 2 & -2 \end{vmatrix} = \\ &= \sqrt{2} - \sqrt{2} + 0 = 0 \end{aligned}$$

$$\det M_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \end{vmatrix} = 2 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} = 2 \cdot \left(\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{vmatrix} \right) = 2 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = 2\sqrt{2}$$

Caso 3: cardinales E, S y cuadrantales SE, NW (un cuadrantal entre los dos cardinales)

$$\det M_1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 2 & 0 & 0 & -2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 0 & 0 & -2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 2 & 0 & -2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 2 & -2 \end{vmatrix} =$$

$$= -\sqrt{2} - \sqrt{2} + 0 = -2\sqrt{2}$$

$$\det M_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \end{vmatrix} = 2 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} = 2 \cdot \left(\begin{vmatrix} -1 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{vmatrix} \right) = 2 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = 0$$

Caso 4: cardinales E, S y cuadrantales NE, SW (ningún cuadrantal entre los dos cardinales)

$$\det M_1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 2 \end{vmatrix} = \sqrt{2} - \sqrt{2} + 0 = 0$$

$$\det M_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{vmatrix} = -2 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} = 2 \cdot \left(\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{vmatrix} \right) = 2 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = 2\sqrt{2}$$

Caso 5: cardinales W, N y cuadrantales SE, NW (un cuadrantal entre los dos cardinales)

$$\det M_1 = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 2 & 0 & 0 & -2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 0 & 0 & -2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 2 & 0 & -2 \end{vmatrix} = -\begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 2 & -2 \end{vmatrix} =$$

$$= \sqrt{2} + \sqrt{2} + 0 = 2\sqrt{2}$$

$$\det M_2 = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \end{vmatrix} = 2 \cdot \begin{vmatrix} -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} = 2 \cdot \left(-\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{vmatrix} \right) = 2 \cdot \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = 0$$

Caso 6: cardinales W, N y cuadrantales NE, SW (ningún cuadrantal entre los dos cardinales)

$$\det M_1 = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = -\begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 2 \end{vmatrix} = -\sqrt{2} + \sqrt{2} + 0 = 0$$

$$\det M_2 = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{vmatrix} = -2 \cdot \begin{vmatrix} -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} = -2 \cdot \left(-\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{vmatrix} \right) = -2 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = -2\sqrt{2}$$

Caso 7: cardinales W, S y cuadrantales NE, SW (un cuadrantal entre los dos cardinales)

$$\det M_1 = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 2 \end{vmatrix} = \sqrt{2} + \sqrt{2} + 0 = 2\sqrt{2}$$

$$\det M_2 = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{vmatrix} = -2 \cdot \begin{vmatrix} -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} = -2 \cdot \left(-\begin{vmatrix} -1 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{vmatrix} \right) = -2 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = 0$$

Caso 8: cardinales W, S y cuadrantales SE, NW (ningún cuadrantal entre los dos cardinales)

$$\det M_1 = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 2 & 0 & 0 & -2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 0 & 0 & -2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 2 & 0 & -2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 2 & -2 \end{vmatrix} =$$

$$= -\sqrt{2} + \sqrt{2} + 0 = 0$$

$$\det M_2 = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \end{vmatrix} = 2 \cdot \begin{vmatrix} -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} = 2 \cdot \left(-\begin{vmatrix} -1 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{vmatrix} \right) =$$

$$= 2 \cdot \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = -2\sqrt{2}$$

CONCLUSIÓN

Cuando un rumbo cuadrantal está entre los dos rumbos cardinales, el sistema 1 tiene solución, mientras que el sistema 2 es indeterminado. Por el contrario, cuando ningún rumbo cuadrantal está entre los dos rumbos cardinales, el sistema 1 es indeterminado, mientras que el sistema 2 tiene solución.

IV.4.4. Exposición del método y determinación de los coeficientes

Teniendo en cuenta las observaciones hechas en el epígrafe IV.4.1 sobre el valor de los coeficientes que se obtengan, así como sobre la colocación previa de las esferas y de la barra Flinders, el método propuesto consiste en:

Seguir dos rumbos magnéticos cardinales separados 90° , y anular el desvío a cada uno de ellos, actuando sobre los imanes correctores. Luego, seguir un rumbo magnético cuadrantal, y anular el desvío con las esferas (o dispositivos análogos). Si no se trata de la primera compensación, el coeficiente D raramente habrá variado, de manera que otra opción consiste solo en tomar el desvío a dicho rumbo, sin actuar sobre las esferas, las cuales ya están ajustadas para compensar el coeficiente D. Y finalmente, seguir el rumbo opuesto a este cuadrantal, y tomar su desvío.

Tras anular los desvíos a los rumbos cardinales, sean Δ_1 , Δ_2 los desvíos a los rumbos cuadrantales primero y segundo, siendo el segundo rumbo el opuesto del primero.

Si se obvia el coeficiente E, el primer rumbo cuadrantal debe ser el que se encuentre entre los dos rumbos cardinales, y los coeficientes A, B, C, D para confeccionar la tablilla de los desvíos residuales, vienen dados por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} 1 & \sin(90^\circ, 270^\circ) & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cos(0^\circ, 180^\circ) & 0 \\ 1 & \sin(45^\circ+90^\circ \cdot k) & \cos(45^\circ+90^\circ \cdot k) & \sin(90^\circ+180^\circ \cdot k) \\ 1 & -\sin(45^\circ+90^\circ \cdot k) & -\cos(45^\circ+90^\circ \cdot k) & \sin(90^\circ+180^\circ \cdot k) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{pmatrix}$$

donde k determina el primer rumbo cuadrantal, pudiendo ser: 0 (NE), 1 (SE), 2 (SW), 3 (NW).

Por el contrario, si se obvia el coeficiente A, ningún rumbo cuadrantal debe encontrarse entre los dos rumbos cardinales, y los coeficientes B, C, D, E para confeccionar la tablilla de los desvíos residuales, vienen dados por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} \sin(90^\circ, 270^\circ) & 0 & 0 & -1 \\ 0 & \cos(0^\circ, 180^\circ) & 0 & 1 \\ \sin(45^\circ+90^\circ \cdot k) & \cos(45^\circ+90^\circ \cdot k) & \sin(90^\circ+180^\circ \cdot k) & 0 \\ -\sin(45^\circ+90^\circ \cdot k) & -\cos(45^\circ+90^\circ \cdot k) & \sin(90^\circ+180^\circ \cdot k) & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{pmatrix}$$

donde k determina el primer rumbo cuadrantal, pudiendo ser: 0 (NE), 1 (SE), 2 (SW), 3 (NW).

A continuación, se obtienen los coeficientes en los casos 1 y 2 del epígrafe V.4.3.

CASO 1: se arrumba al E; luego al N (o viceversa); luego al NE, y finalmente, al SW.

En este caso, se debe considerar el coeficiente A, y despreciar el E. Por tanto, el sistema de ecuaciones es el siguiente:

$$\begin{pmatrix} 1 & \sin 90^\circ & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cos 0^\circ & 0 \\ 1 & \sin(45^\circ+90^\circ \cdot 0) & \cos(45^\circ+90^\circ \cdot 0) & \sin(90^\circ+180^\circ \cdot 0) \\ 1 & -\sin(45^\circ+90^\circ \cdot 0) & -\cos(45^\circ+90^\circ \cdot 0) & \sin(90^\circ+180^\circ \cdot 0) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 1 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 \end{pmatrix}$$

En el caso 1 del epígrafe IV.4.3, se obtuvo $\det M_1 = -2\sqrt{2}$. En consecuencia,

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{-2\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \Delta_1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 & 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \Delta_1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} \Delta_1 & 1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 & 2 \end{vmatrix} = \\ &= -\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (2\Delta_1 - \Delta_1 - \Delta_2) = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_2 - \Delta_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{-2\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & \Delta_1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & \Delta_1 + \Delta_2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \Delta_1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} \Delta_1 & 1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 & 2 \end{vmatrix} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (2\Delta_1 - \Delta_1 - \Delta_2) = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_1 - \Delta_2) = -A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{-2\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \Delta_1 & 1 \\ 2 & 0 & \Delta_1 + \Delta_2 & 2 \end{vmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & \Delta_1 & 1 \\ 2 & \Delta_1 + \Delta_2 & 2 \end{vmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} \Delta_1 & 1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 & 2 \end{vmatrix} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (2\Delta_1 - \Delta_1 - \Delta_2) = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_1 - \Delta_2) = -A \end{aligned}$$

$$D = \frac{1}{-2\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \Delta_1 \\ 2 & 0 & 0 & \Delta_1 + \Delta_2 \end{vmatrix} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \Delta_1 \\ 0 & 0 & \Delta_1 + \Delta_2 \end{vmatrix} + \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \Delta_1 \\ 2 & 0 & \Delta_1 + \Delta_2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{aligned} D &= \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \Delta_1 \\ 0 & \Delta_1 + \Delta_2 \end{vmatrix} + \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \Delta_1 \\ 0 & \Delta_1 + \Delta_2 \end{vmatrix} - \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} 1 & \Delta_1 \\ 2 & \Delta_1 + \Delta_2 \end{vmatrix} = \\ &= 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\Delta_1 + \Delta_2) - \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_1 + \Delta_2 - 2\Delta_2) = \frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2) + \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_2 - \Delta_1) = \frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2) - A \end{aligned}$$

De hecho, una vez se ha obtenido el coeficiente A, los coeficientes B, C, D se obtienen, respectivamente, de las ecuaciones correspondientes a las filas 1, 2, 4 de la matriz cuadrada. Es decir:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} (1 & 1 & 0 & 0) \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = 0 \Rightarrow A + B = 0 \Rightarrow B = -A \\ (1 & 0 & 1 & 0) \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = 0 \Rightarrow A + C = 0 \Rightarrow C = -A \\ (2 & 0 & 0 & 2) \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \Delta_1 + \Delta_2 \Rightarrow \begin{cases} 2A + 2D = \Delta_1 + \Delta_2 \rightarrow \\ \rightarrow D = \frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2) - A \end{cases} \end{cases}$$

De este caso, se puede generalizar la expresión de los coeficientes cuando se obvia el E:

Si se arrumba al Em y se anula el desvío, $B = -A$; pero si se sigue el Wm, $B = A$; pues la fila 1 es: $(1 \pm 1 \ 0 \ 0)$, donde el segundo término es 1 (= sin 90°) al Em y -1 (= sin 270°) al Wm.

Si se arrumba al Nm y se anula el desvío, $C = -A$; pero si se sigue el Sm, $C = A$; pues la fila 2 es: $(1 \ 0 \pm 1 \ 0)$, donde el tercer término es 1 (= cos 0°) al Nm y -1 (= cos 180°) al Sm.

Si se arrumba al NEm y al SEm, $D = \frac{1}{2}(\Delta_{ne} + \Delta_{sw}) - A$, pues la fila 4 es: $(2 \ 0 \ 0 \ 2)$, de manera que $2A + 2D = \Delta_{ne} + \Delta_{sw}$;

pero si se sigue el SEm y el NWm, $D = A - \frac{1}{2}(\Delta_{se} + \Delta_{nw})$, pues la fila 4 es: $(2 \ 0 \ 0 \ -2)$, de manera que $2A - 2D = \Delta_{se} + \Delta_{nw}$.

En cuanto al coeficiente A, este se debe calcular mediante la regla de Carmer para cada caso concreto. En la Tabla 43, se compilan los valores de los coeficientes B, C y D en función del coeficiente A y de los rumbos cardinales que se sigan.

Rumbos magnéticos	B	C	D
E, N	-A	-A	$\frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2) - A$
E, S	-A	A	$A - \frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2)$
W, N	A	-A	$A - \frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2)$
W, S	A	A	$\frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2) - A$

Tabla 43. Valores de los coeficientes B, C y D en función del coeficiente A y de los rumbos cardinales que se sigan, cuando se obvia el coeficiente E. Fuente: Propia.

CASO 2: se arrumba al E; luego al N; luego al NW, y finalmente, al SE.

En este caso, se debe considerar el coeficiente E, y despreciar el A. Por tanto, considerando que el primer rumbo cuadrantal es el NW (k = 3), el sistema de ecuaciones es el siguiente:

$$\begin{pmatrix} \sin 90^\circ & 0 & 0 & -1 \\ 0 & \cos 0^\circ & 0 & 1 \\ \sin(45^\circ+90^\circ \cdot 3) & \cos(45^\circ+90^\circ \cdot 3) & \sin(90^\circ+180^\circ \cdot 3) & 0 \\ -\sin(45^\circ+90^\circ \cdot 3) & -\cos(45^\circ+90^\circ \cdot 3) & \sin(90^\circ+180^\circ \cdot 3) & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 \end{pmatrix}$$

En el caso 2 del epígrafe IV.4.3, se obtuvo $\det M_2 = 2\sqrt{2}$; pero la fila 3 de la matriz cuadrada correspondía al SE, mientras que ahora, en el borneo planteado (W, N, NW, SE), la fila 3 corresponde al NW. Por tanto, se debe calcular el valor de $\det M_2$ para el borneo planteado.

$$\det M_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \end{vmatrix} = 2 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} = 2 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} - 2 \cdot \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{vmatrix} = 2 \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = -2\sqrt{2}$$

Una vez obtenido el valor de $\det M_2$, se calculan los coeficientes:

$$B = \frac{1}{-2\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \Delta_1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 & 0 \\ \Delta_1 + \Delta_2 & 0 & -2 & 0 \end{vmatrix} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \Delta_1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 & 0 & -2 \end{vmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} \Delta_1 & -1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 & -2 \end{vmatrix} =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (-2\Delta_1 + \Delta_1 + \Delta_2) = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_2 - \Delta_1)$$

$$C = \frac{1}{-2\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \Delta_1 & -1 & 0 \\ 0 & \Delta_1 + \Delta_2 & -2 & 0 \end{vmatrix} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \Delta_1 & -1 \\ 0 & \Delta_1 + \Delta_2 & -2 \end{vmatrix} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} \Delta_1 & -1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 & -2 \end{vmatrix} =$$

$$= -\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (-2\Delta_1 + \Delta_1 + \Delta_2) = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_1 - \Delta_2)$$

$$D = \frac{1}{-2\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \Delta_1 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta_1 + \Delta_2 & 0 \end{vmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_1 + \Delta_2) \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_1 + \Delta_2) \cdot \left(\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{vmatrix} \right) = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_1 + \Delta_2) \cdot \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = -\frac{1}{2} (\Delta_1 + \Delta_2)$$

$$E = \frac{1}{-2\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 & \Delta_1 \\ 0 & 0 & -2 & \Delta_1 + \Delta_2 \end{vmatrix} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 & \Delta_1 \\ 0 & -2 & \Delta_1 + \Delta_2 \end{vmatrix} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \begin{vmatrix} -1 & \Delta_1 \\ -2 & \Delta_1 + \Delta_2 \end{vmatrix} =$$

$$= -\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (-\Delta_1 - \Delta_2 + 2\Delta_1) = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_2 - \Delta_1)$$

Los coeficientes B, C, D también se obtienen, respectivamente, de las ecuaciones correspondientes a las filas 1, 2, 4 de la matriz cuadrada; pero a diferencia del caso 1, en este, el coeficiente D no está relacionado con ningún otro coeficiente, siendo directamente la media entre Δ_1 y Δ_2 (con el signo correspondiente). Es decir:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_1 \\ \Delta_1 + \Delta_2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} (1 \ 0 \ 0 \ -1) \cdot \begin{pmatrix} B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = 0 \Rightarrow B - E = 0 \Rightarrow B = E \\ (0 \ 1 \ 0 \ 1) \cdot \begin{pmatrix} B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = 0 \Rightarrow C + E = 0 \Rightarrow C = -E \\ (0 \ 0 \ -2 \ 0) \cdot \begin{pmatrix} B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = \Delta_1 + \Delta_2 \Rightarrow \begin{cases} -2D = \Delta_1 + \Delta_2 \rightarrow \\ \rightarrow D = -\frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2) \end{cases} \end{cases}$$

De manera análoga al caso 1, también se puede generalizar la expresión de los coeficientes cuando se obvia el A:

Si se arrumba al Em y se anula el desvío, $B = E$; pero si se sigue el Wm, $B = -E$; pues la fila 1 es: $(\pm 1 \ 0 \ 0 \ -1)$, donde el primer término es 1 (= sin 90°) al Em y -1 (= sin 270°) al Wm.

Si se arrumba al Nm y se anula el desvío, $C = -E$; pero si se sigue el Sm, $C = E$; pues la fila 2 es: $(0 \ \pm 1 \ 0 \ 1)$, donde el segundo término es 1 (= cos 0°) al Nm y -1 (= cos 180°) al Sm.

Si se arrumba al NEm y al SEM, $D = \frac{1}{2} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw})$, pues la fila 4 es: $(0 \ 0 \ 2 \ 0)$, de manera que $2D = \Delta_{ne} + \Delta_{sw}$;

pero si se sigue el SEM y el NWm, $D = -\frac{1}{2} (\Delta_{se} + \Delta_{nw})$, pues la fila 4 es: $(0 \ 0 \ -2 \ 0)$, de manera que $-2D = \Delta_{se} + \Delta_{nw}$.

En cuanto al coeficiente E, este se debe calcular mediante la regla de Cramer para cada caso concreto. En la Tabla 44, se compilan los valores de los coeficientes B, C y D en función del coeficiente E y de los rumbos cardinales que se sigan.

Rumbos magnéticos	B	C	D
E, N	E	-E	$\frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2)$
E, S	E	E	$-\frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2)$
W, N	-E	-E	$-\frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2)$
W, S	-E	E	$\frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2)$

Tabla 44. Valores de los coeficientes B, C y D en función del coeficiente E y de los rumbos cardinales que se sigan, cuando se obvia el coeficiente A. Fuente: Propia.

IV.4.5. Segunda discusión del método: selección del coeficiente del que dependen las varillas d, b

En los epígrafes anteriores, se ha considerado y discutido el hecho de tener en cuenta uno de los coeficientes A, E y obviar el otro; pero esto se ha realizado únicamente para obtener el sistema de ecuaciones adecuado para cada caso, sin analizar los efectos magnéticos.

Como consecuencia de lo expuesto en el epígrafe IV.2.1, considerar solo uno de los coeficiente A, E, implica suponer que las varillas d, b son iguales. Concretamente, si se considera el coeficiente A y se obvia el E, se supone que las varillas d, b son iguales y de diferente signo; mientras que si se considera el coeficiente E y se obvia el A, se supone que las varillas d, b son iguales y del mismo signo.

Por su parte, el profesor Gaztelu-Iturri siempre considera que la compensación reducida se lleva a cabo anulando el desvío al rumbo cuadrantal intermedio entre los dos cardinales a los que también se ha anulado el desvío. Es decir: anula los desvíos a los rumbos de un solo cuadrante (Gaztelu-Iturri, 1999, p. 73). Por tanto, de acuerdo con la conclusión del epígrafe IV.4.3, para confeccionar la tablilla de los desvíos residuales con un solo borneo de cuatro rumbos, el sistema de ecuaciones debe ser el que considera el coeficiente A y obvia el E.

Asimismo, los desvíos a los rumbos cuadrantales dependen del coeficiente A, pero no del E, y además, de acuerdo con el planteamiento realizado en el epígrafe IV.3.6, se tiene que:

Siendo η el error medio cuando se considera la fórmula práctica del desvío a los rumbos cuadrantales, el cual se puede obviar, y ξ el error máximo cometido, el cual tiene un valor apreciable, resulta que los desvíos a los rumbos cuadrantales (suponiendo que el rumbo al que se produce el error máximo es el NE) son:

$$\begin{aligned}\Delta_{ne} &= \bar{A} + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + \xi \\ \Delta_{se} &= \bar{A} + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + \eta \\ \Delta_{sw} &= \bar{A} - \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + 2\eta - \xi \\ \Delta_{nw} &= \bar{A} - \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + \eta\end{aligned}$$

donde \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} son los coeficientes residuales según la fórmula práctica del desvío.

Por tanto, el coeficiente D residual es:

$$D = \frac{1}{4}(\Delta_{ne} + \Delta_{sw} - \Delta_{se} - \Delta_{nw}) \quad D = \frac{1}{2}(\Delta_{ne} + \Delta_{sw}) - \bar{A} - \eta \quad D = -\frac{1}{2}(\Delta_{se} + \Delta_{nw}) + \bar{A} + \eta$$

Las dos últimas expresiones son casi idénticas a las que se obtienen del sistema de ecuaciones que considera el coeficiente A y obvia el E; de manera que: tanto si se obvia el valor de η , como si se considera η como parte del coeficiente A, las expresiones son las mismas que se obtiene de dicho sistema. El hecho de considerar η como parte del coeficiente A, tiene su base en que $\eta = 2K$ (epígrafe IV.3.6, p. 210), siendo K el coeficiente del desvío octantal, el cual está relacionado con el coeficiente A de la fórmula práctica del desvío: $\bar{A} = A + K$ (epígrafe IV.3.2, p. 192).

Por otro lado, el factor del que dependen los coeficientes de la ecuación del desvío cuando se aplica el método propuesto es: $\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_2 - \Delta_1)$. Si se consideran los rumbos cuadrantales en los que no se produce el error máximo (SE y NW en el ejemplo), se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_2 - \Delta_1) &= \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_{nw} - \Delta_{se}) = (\bar{A} - \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + \eta) - (\bar{A} + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - D + \eta) \\ \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_2 - \Delta_1) &= \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_{nw} - \Delta_{se}) = -\bar{B} \cdot \sqrt{2} + \bar{C} \cdot \sqrt{2} \end{aligned}$$

En consecuencia, este factor depende únicamente de los coeficientes \bar{B} , \bar{C} , siendo este el resultado que cabe esperar.

No obstante, si se consideran los rumbos cuadrantales en los que uno de ellos está afectado por el error máximo, se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_2 - \Delta_1) &= \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_{sw} - \Delta_{ne}) = (\bar{A} - \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + 2\eta - \xi) - (\bar{A} + \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \bar{C} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + D + \xi) \\ \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_2 - \Delta_1) &= \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (\Delta_{sw} - \Delta_{ne}) = -\bar{B} \cdot \sqrt{2} - \bar{C} \cdot \sqrt{2} + 2\eta - 2\xi \end{aligned}$$

En este caso, el factor depende de los coeficientes \bar{B} , \bar{C} y de los errores η , ξ . Es decir: vuelve a aparecer el error η , que interviene en la expresión de D; pero además, también aparece el error máximo ξ , el cual no interviene en ninguna otra expresión de los coeficientes. Luego, teniendo en cuenta que, tanto el error η se relaciona con el coeficiente A, como el hecho de que ξ solo aparece en una de las dos opciones de rumbos cuadrantales opuestos, resulta más adecuado relacionar el error ξ con el coeficiente A que con el E.

Así pues, por todo lo expuesto, se considera más oportuno considerar el coeficiente A y obviar E, siendo la ecuación del desvío conforme al método propuesto, la siguiente:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R'$$

IV.4.6. Verificación del método

A continuación, se aplica y se analiza el método propuesto en once casos: cuatro compensaciones reducidas del estudio del profesor Gaztelu-Iturri, y siete casos tratados en el capítulo IV.3 (no se incluyen los buques que no estaban compensados).

Al final del libro *Compensación de la aguja náutica: curso de compensador*, del profesor Gaztelu-Iturri, se exponen cuatro casos de compensación reducida: los dos primeros fueron realizados en un desvioscopio, y los otros dos, en compases magnéticos.

En el CASO 1 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, se anularon los desvíos a los siguientes rumbos magnéticos, y en el orden que se indica: N, E, NE. Los desvíos obtenidos a los restantes cinco rumbos principales fueron todos cero. Por tanto, en este caso, no se puede realizar ninguna comparativa como en los sucesivos; pero el método propuesto da un resultado satisfactorio.

En el CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, se anularon los desvíos a los siguientes rumbos magnéticos, y en el orden que se indica: W, S, SW. Los desvíos residuales obtenidos fueron:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ	0	0,5	0,5	1	0	0	0	-1,5

Tabla 45. Desvíos residuales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Gaztelu-Iturri, 1999, p. 113.

Realizando el análisis que se llevó a cabo en el epígrafe IV.3.3, resulta que: con estos desvíos, se determinan los ocho coeficientes A,...,K, a la vez que con los cuatro cardinales, se obtienen los coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E :

A	B	C	D	E	F	G	K
0,063	0,655	-0,354	0,25	-0,125	0,405	0,354	0,063

Tabla 46. Coeficientes A,...,K residuales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.

\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E
0,125	0,25	0	-0,125

Tabla 47. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.

Luego, según el desvío al rumbo cuadrantal que se considere, resultan las siguientes curvas:

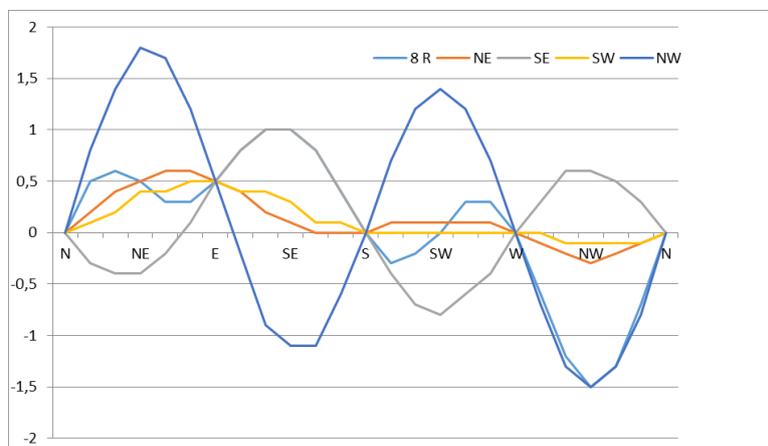


Figura 113. Desvíos residuales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.

En este caso, la curva que se desajusta es la correspondiente al NW, lo que indica que: de acuerdo con el resultado del epígrafe IV.3.2, los coeficientes F y G deben tener el mismo signo, como así es, ya que ambos son positivos.

Asimismo, el coeficiente D medio es:

$$D = \frac{1}{4}(\Delta_{ne} + \Delta_{sw} - \Delta_{se} - \Delta_{nw}) = \frac{1}{4}(0,5 + 0 - 1 + 1,5) = 0,25$$

Y los coeficientes residuales A, B, C, D del método propuesto se obtienen del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} 1 & \sin 270^\circ & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cos 180^\circ & 0 \\ 1 & \sin 225^\circ & \cos 225^\circ & \sin 450^\circ \\ 1 & \sin 45^\circ & \cos 45^\circ & \sin 90^\circ \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,5 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,5 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,5 \end{pmatrix}$$

$$\det M = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 2 \end{vmatrix} = -2\sqrt{2}$$

$$A = \frac{1}{-2\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \\ 0,5 & 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \frac{-0,5}{-2\sqrt{2}} \cdot \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \end{vmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{8} \cdot (-1) \cdot \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \end{vmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{8} = 0,177$$

De la fila 1, resulta que: A – B = 0, con lo cual, B = A = 0,177. Y de la fila 2, A – C = 0, con lo cual, C = A. Finalmente, de la fila 4, se tiene: 2A + 2D = 0,5, de modo que D = 0,5/2 – A = 0,25 – 0,177 = 0,073. Estos resultados se han obtenido también en una hoja de cálculo, y en los casos sucesivos, ya no se reproducirá el cálculo manual, sino que se darán directamente los resultados de la hoja de cálculo.

En la Tabla 48, se muestra: arriba, los desvíos residuales a los rumbos principales obtenidos aplicando la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio, y abajo, los desvíos residuales a los rumbos principales obtenidos mediante los coeficientes del método propuesto.

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ fórmula práctica	0	0,552	0,5	0,052	0	0,198	0	-0,302
Δ método propuesto	0,354	0,5	0,354	0,104	0	0	0	0,104

Tabla 48. Desvíos residuales a los rumbos principales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

En la Figura 114, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.), tal como se hizo en el epígrafe IV.3.5. Y análogamente, en la Figura 115, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o se aplique el método propuesto (dcha.).

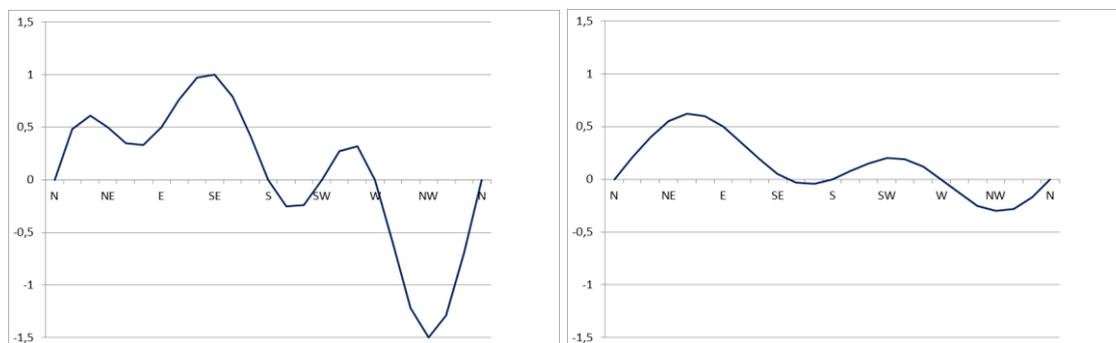


Figura 114. Desvíos residuales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.

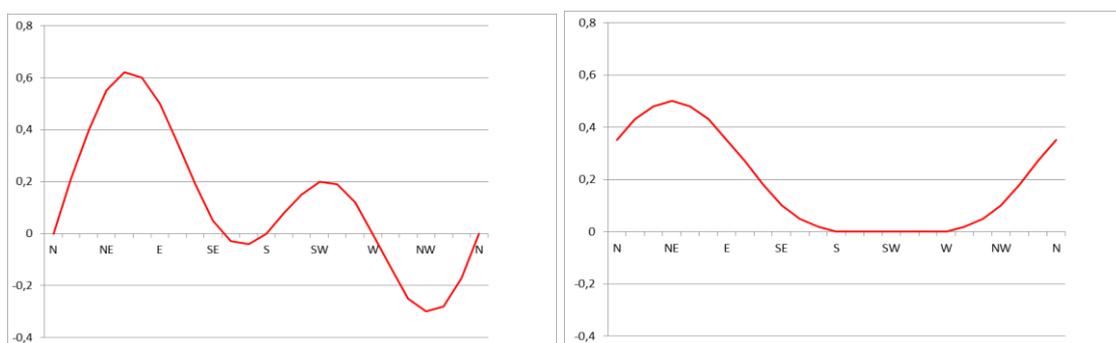


Figura 115. Desvíos residuales del CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.

Los desvíos obtenidos mediante la fórmula práctica se consideran correctos. No obstante, hay diferencias entre los valores calculados y los observados. En base a estas diferencias, se puede determinar si el método propuesto es adecuado o no. Pues si las diferencias entre los desvíos calculados mediante el método propuesto y los desvíos observados, son parecidas a las diferencias entre los desvíos calculados mediante la fórmula práctica y los observados, el método será adecuado, ya que será casi tan exacto como la fórmula práctica. Por el contrario, si las diferencias correspondientes al método propuesto, son notablemente mayores que las correspondientes a la fórmula práctica, el método no será adecuado, ya que no llegará a tener la exactitud de la fórmula práctica. En la Tabla 49, se muestran las diferencias indicadas.

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Dif. fórmula práctica	0	0,052	0	-0,948	0	0,198	0	1,198
Dif. método propuesto	0,354	0	-0,146	-0,896	0	0	0	1,604

Tabla 49. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

Se observa que: cuando se aplica la fórmula práctica, las diferencias nulas se producen a los rumbos cardinales; mientras que cuando se aplica el método propuesto, las diferencias nulas se producen a los tres rumbos a los que se anulaban los desvíos, y al rumbo opuesto al cuadrantal en el que se anuló el desvío. Es decir: en ambos casos, hay cuatro rumbos en los que las diferencias son cero. Asimismo, la diferencia máxima correspondiente a la fórmula práctica es de 1,198°, mientras que la correspondiente al método propuesto es de 1,604°. Ambas diferencias máximas son parecidas, siendo ligeramente superior la correspondiente al método propuesto. Además, se dan al mismo rumbo, siendo la diferencia entre ellas, de 0,406°. En la Figura 116, se muestran estas diferencias.

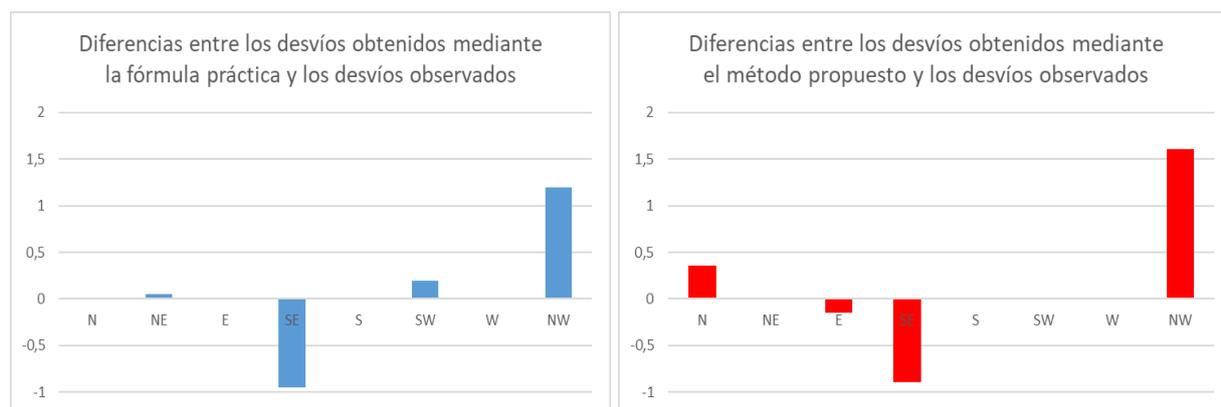


Figura 116. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el CASO 2 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

De acuerdo con estos datos, se concluye que: en este caso, el método propuesto tiene una exactitud similar a la de la fórmula práctica del desvío, y por tanto, el resultado es satisfactorio.

En el CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, se anulaban los desvíos a los siguientes rumbos magnéticos, y en el orden que se indica: N, E, NE. Los desvíos residuales obtenidos fueron:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ	0	0	0	2	2,5	1,5	-2	-2,5

Tabla 50. Desvíos residuales del CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Gaztelu-Iturri, 1999, p. 116.

Realizando el análisis que se llevó a cabo en el epígrafe IV.3.3, resulta que: con estos desvíos, se determinan los ocho coeficientes A,...,K, a la vez que con los cuatro cardinales, se obtienen los coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E :

A	B	C	D	E	F	G	K
0,188	1,030	-1,686	0,5	1,125	0,030	0,436	-0,063

Tabla 51. Coeficientes A,...,K residuales del CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.

\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E
0,125	1	-1,25	1,125

Tabla 52. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.

Luego, según el desvío al rumbo cuadrantal que se considere, resultan las siguientes curvas:

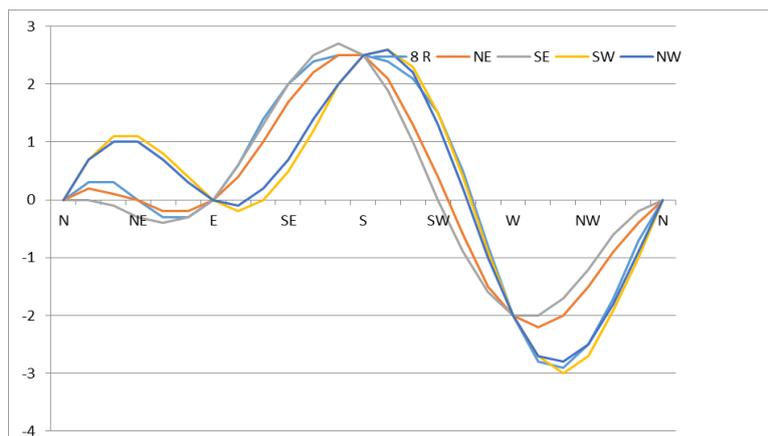


Figura 117. Desvíos residuales del CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.

En este caso, todas las curvas son bastante parecidas, siendo muy similares las correspondientes al NE y al SE, así como las correspondientes al SW y al NW. No obstante, la que ligeramente se aparta más de la curva que considera los ocho desvíos, es la correspondiente al SE, lo cual es coherente con el resultado del epígrafe IV.3.2, ya que los coeficientes F y G tienen el mismo signo. En la Figura 118, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.), tal como se hizo en el epígrafe IV.3.5.

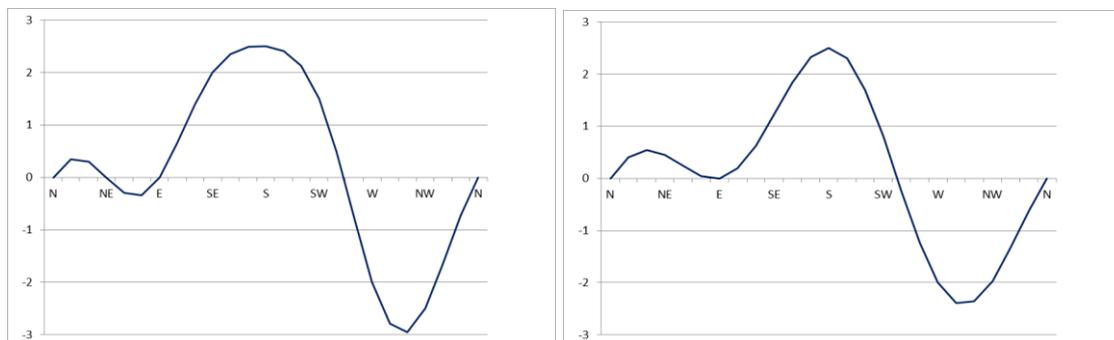


Figura 118. Desvíos residuales del CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.

En cuanto a la aplicación y análisis del método propuesto, en la Tabla 53, se muestran los coeficientes residuales según el método, y en la Tabla 54, los siguientes datos: los desvíos residuales calculados con la fórmula práctica del desvío, considerando el coeficiente D medio; los desvíos residuales calculados con los coeficientes del método propuesto; las diferencias entre los desvíos calculados con la fórmula práctica y los observados, y las diferencias entre los desvíos calculados con el método y los observados.

A	B	C	D
0,530	-0,530	-0,530	0,220

Tabla 53. Coeficientes residuales según el método propuesto en el CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ fórmula práctica	0	0,448	0	1,216	2,5	0,802	-2	-1,966
Δ método propuesto	0	0	0	0,311	1,061	1,5	1,061	0,311
Dif. fórmula práctica	0	0,448	0	-0,784	0	-0,698	0	0,534
Dif. método propuesto	0	0	0	-1,689	-1,439	0	3,061	2,811

Tabla 54. Desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

La diferencia máxima (en valor absoluto) correspondiente a la fórmula práctica es de 0,784°, mientras que la correspondiente al método propuesto es de 3,061°. En este caso, la diferencia máxima del método es notablemente superior a la de la fórmula práctica, como también lo son las demás diferencias, ya que el método no considera los desvíos más grandes que se han observado.

En la Figura 119, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o se aplique el método propuesto (dcha.). Y en la Figura 120, se muestran las diferencias entre los desvíos calculados y los observados, según se considere la fórmula práctica (izda.) o el método propuesto (dcha.).

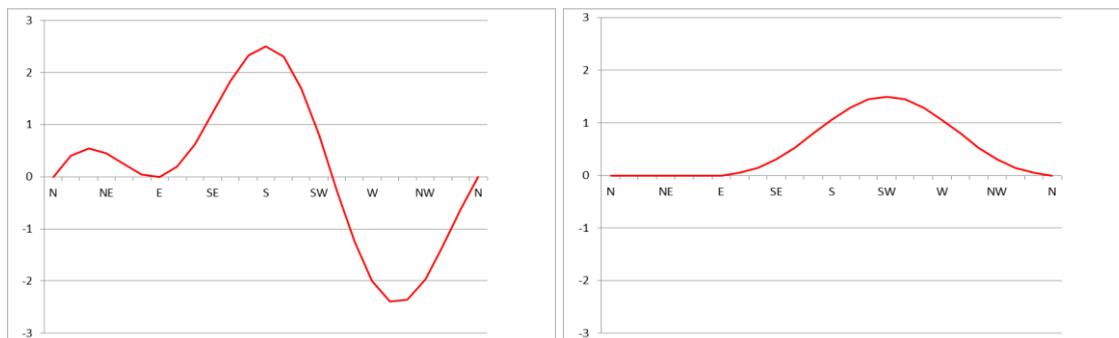


Figura 119. Desvíos residuales del CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.

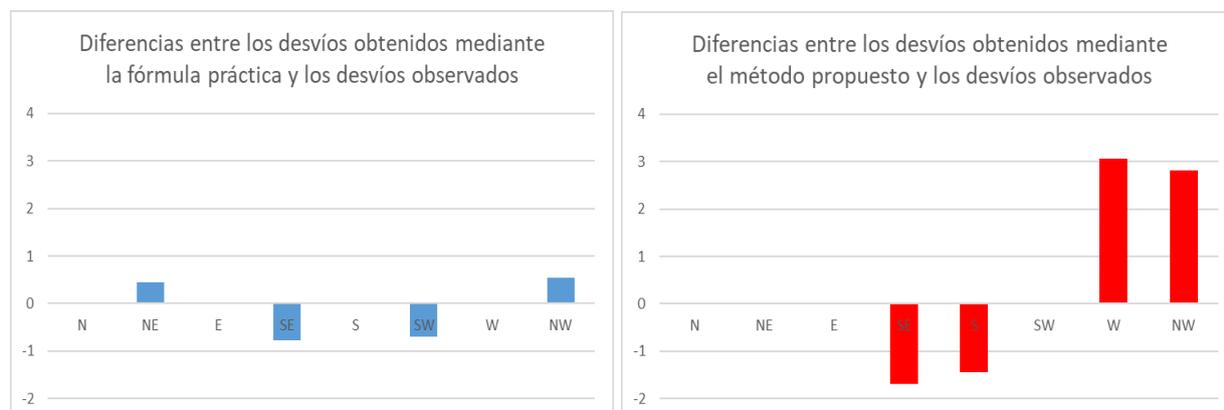


Figura 120. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el CASO 3 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

De acuerdo con estos datos, se concluye que: en este caso, el método propuesto tiene una exactitud inferior a la de la fórmula práctica del desvío, y por tanto, el resultado, *a priori*, no es

satisfactorio. Los resultados que proporciona el método disminuyen en exceso los desvíos observados; pero esto también sucede, con la fórmula práctica, en los buques Allure of the Seas y Mundo Marino Eco (*vide* Figuras 107 y 110), en los que: dicha fórmula disminuye en exceso los desvíos observados a los rumbos cuadrantales. Además, se debe tener en cuenta que: de acuerdo con lo indicado en el epígrafe IV.3.5, el motivo por el cual la fórmula práctica considerando el coeficiente D medio es más adecuada que considerar un solo rumbo cuadrantal, es precisamente porque suaviza la curva de los desvíos residuales, reduciendo los valores más extremos de los desvíos observados. Por tanto, en este caso, se puede entender que el método propuesto estaría reduciendo los tres desvíos más grandes que se han observado. Por tanto, los resultados del método, aunque no sean completamente satisfactorios, se pueden aceptar, del mismo modo que se acepta la fórmula práctica cuando reduce en exceso los desvíos observados.

En el CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, se anularon los desvíos a los siguientes rumbos magnéticos, y en el orden que se indica: W, S, SW. Los desvíos residuales obtenidos fueron:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ	0,5	0	0,5	0,5	0	0	0	1

Tabla 55. Desvíos residuales del CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Gaztelu-Iturri, 1999, p. 117.

Realizando el análisis que se llevó a cabo en el epígrafe IV.3.3, resulta que: con estos desvíos, se determinan los ocho coeficientes A,...,K, a la vez que con los cuatro cardinales, se obtienen los coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E :

A	B	C	D	E	F	G	K
0,313	0,037	0,213	-0,375	0	-0,213	0,037	-0,063

Tabla 56. Coeficientes A,...,K residuales del CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.

\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	E
0,25	0,25	0,25	0

Tabla 57. Coeficientes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , E residuales del CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.

Luego, según el desvío al rumbo cuadrantal que se considere, resultan las siguientes curvas:

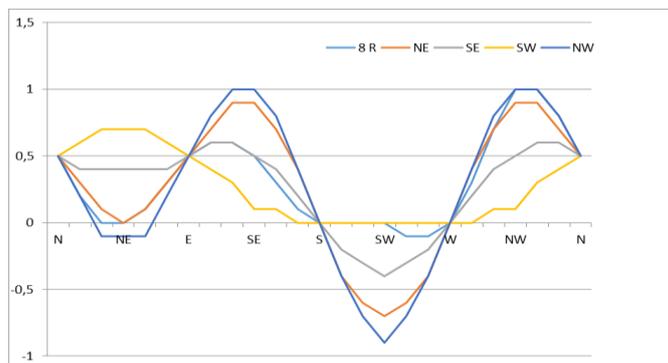


Figura 121. Desvíos residuales del CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según el desvío cuadrantal que se considere. Fuente: Propia.

En este caso, la curva que se desajusta es la correspondiente al SW, lo que es coherente con el resultado del epígrafe IV.3.2, ya que los coeficientes F y G tienen signos diferentes. En la Figura 122, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.), tal como se hizo en el epígrafe IV.3.5.

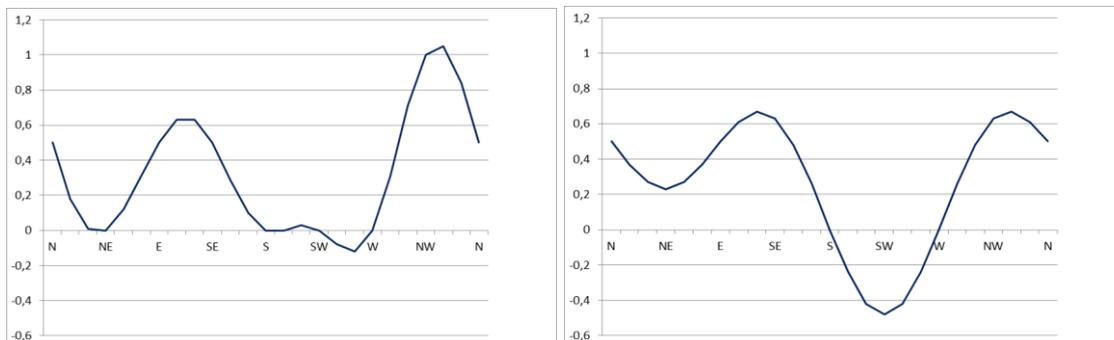


Figura 122. Desvíos residuales del CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se consideren los desvíos sextantal y octantal (izda.) o la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (dcha.). Fuente: Propia.

En cuanto a la aplicación y análisis del método propuesto, en la Tabla 58, se muestran los coeficientes residuales según el método, y en la Tabla 59, los desvíos residuales calculados, y las diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto.

A	B	C	D
0	0	0	0

Tabla 58. Coeficientes residuales según el método propuesto en el CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA. Fuente: Propia.

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ fórmula práctica	0,5	0,229	0,5	0,625	0	-0,479	0	0,625
Δ método propuesto	0	0	0	0	0	0	0	0
Dif. fórmula práctica	0	0,229	0	0,125	0	-0,479	0	-0,375
Dif. método propuesto	-0,5	0	-0,5	-0,5	0	0	0	-1

Tabla 59. Desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

La diferencia máxima (en valor absoluto) correspondiente a la fórmula práctica es de 0,479°, mientras que la correspondiente al método propuesto es de 1°. Asimismo, el rumbo al que se produce la diferencia máxima en la fórmula práctica es el SW, mientras que en el método propuesto es el NW, y la máxima diferencia entre los desvíos calculados mediante la fórmula práctica y el método, se produce a los rumbos SE y NW, siendo de 0,625°. Por tanto, en este caso, la exactitud de la fórmula práctica también es superior a la del método, pero no en exceso.

En la Figura 123, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o se aplique el método propuesto (dcha.). Y en la Figura 124, se muestran las diferencias entre los desvíos calculados y los observados, según se considere la fórmula práctica (izda.) o el método propuesto (dcha.).

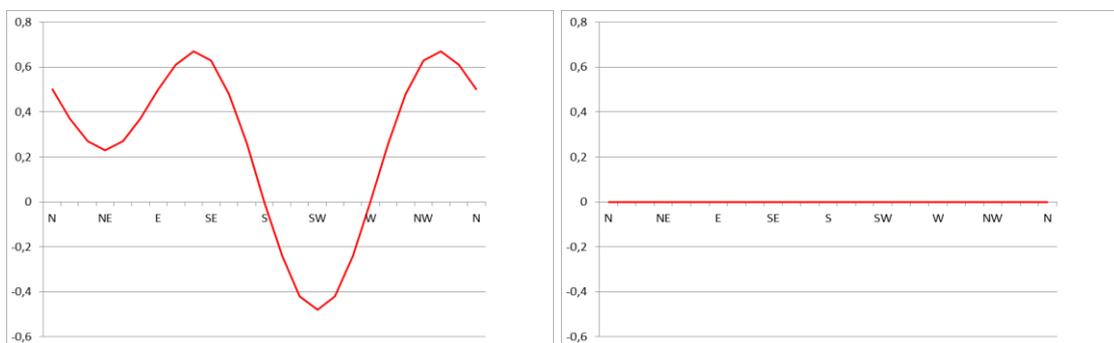


Figura 123. Desvíos residuales del CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.

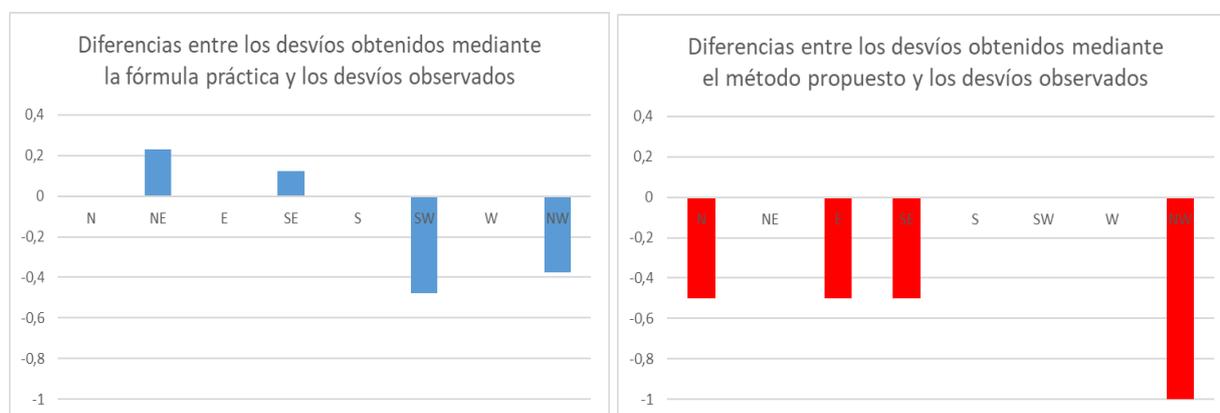


Figura 124. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el CASO 4 DE COMPENSACIÓN REDUCIDA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

De acuerdo con estos datos, se concluye que: en este caso, el método propuesto también da un resultado satisfactorio.

Por tanto, se observa que: en primer lugar, todas las compensaciones reducidas que se han analizado, cumplen con el resultado del epígrafe IV.3.2, y en segundo lugar, el método propuesto da resultados aceptables en todas ellas, aunque con una exactitud inferior a la de la fórmula práctica del desvío.

. . .

Para aplicar el método propuesto a los casos tratados en el capítulos IV.3, se consideran los siguientes rumbos para cada uno de ellos: los dos rumbos cardinales separados 90° y el cuadrantal intermedio cuyos desvíos sean menores (como si fueran estos los desvíos que se hubieran anulado o minimizado) y el rumbo cuadrantal opuesto al intermedio entre los dos cardinales. Los datos de cada caso se muestran siguiendo el modelo de las Tablas 54 y 59, a las que previamente, se les ha añadido una fila con los desvíos residuales observados.

En el caso del car carrier HÖEGH JACKSONVILLE, los rumbos que se consideran para el análisis del método son: E, N, NE, SW. Y los datos obtenidos son los siguientes:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ observados	1	0	1	1,5	1	0	1	1
Δ fórmula práctica	1	0,375	1	1,625	1	0,375	1	1,625
Δ método propuesto	1	0	1	2	1	0	1	2
Dif. fórmula práctica	0	0,375	0	0,125	0	0,375	0	0,625
Dif. método propuesto	0	0	0	0,5	0	0	0	1

Tabla 60. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque HÖEGH JACKSONVILLE, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

En la Figura 125, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se considere la fórmula práctica con el coeficiente D medio o el método propuesto, y en la Figura 126, las diferencias entre los desvíos calculados y los observados, según se aplique la fórmula práctica o el método.

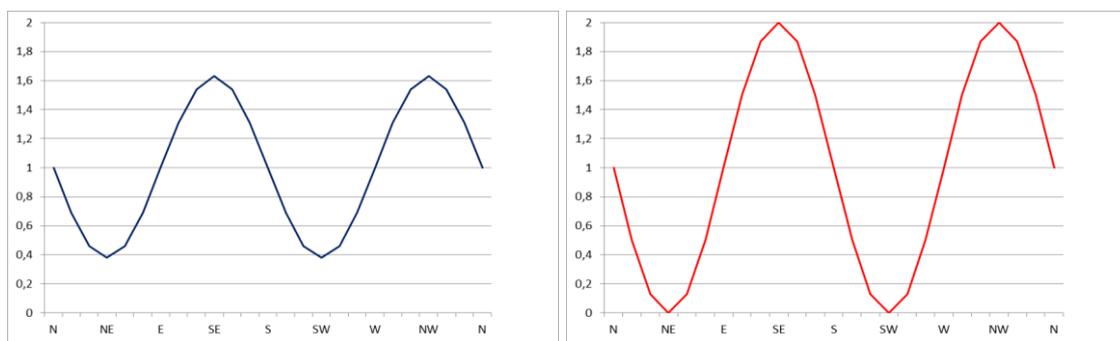


Figura 125. Desvíos residuales del buque HÖEGH JACKSONVILLE, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.

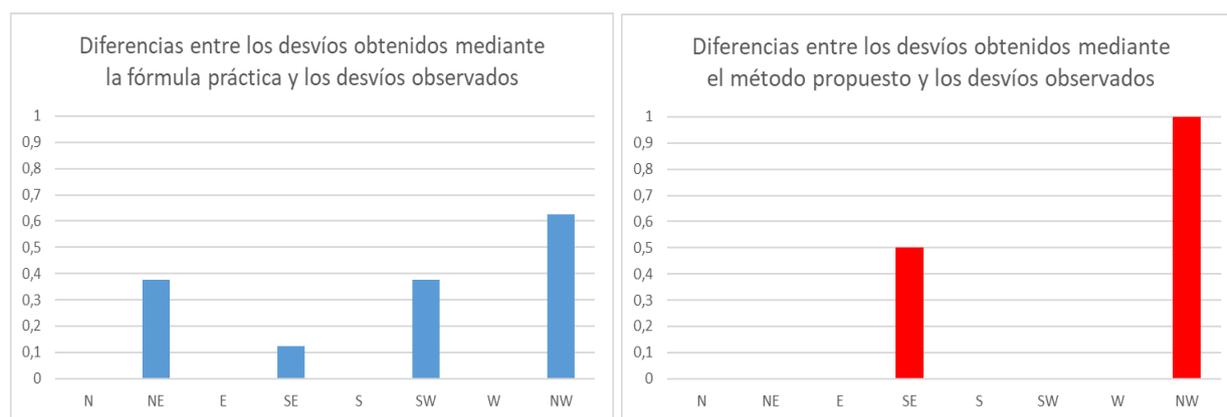


Figura 126. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque HÖEGH JACKSONVILLE, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

La diferencia máxima (en valor absoluto) correspondiente a la fórmula práctica es de 0,625°, mientras que la correspondiente al método propuesto es de 1°, ambas al NW. Por tanto, la exactitud de la fórmula práctica es superior a la del del método, pero no en exceso. Además, el

método propuesto solo difiere en dos de los desvíos observados. Así pues, de estos datos, se concluye que el método propuesto da un resultado satisfactorio.

En el caso del crucero ALLURE OF THE SEAS, los rumbos que se consideran para el análisis del método son: W, N, NW, SE. Y los datos obtenidos, los siguientes:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ observados	1	-3	-1	1	2	2	0,5	0
Δ fórmula práctica	1	-0,759	-1	0,948	2	1,009	0,5	1,302
Δ método propuesto	1	2,061	1,707	1	1,207	1,354	0,5	0
Dif. fórmula práctica	0	2,241	0	-0,052	0	-0,991	0	1,302
Dif. método propuesto	0	5,061	2,707	0	-0,793	-0,646	0	0

Tabla 61. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque ALLURE OF THE SEAS, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

En la Figura 127, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se considere la fórmula práctica con el coeficiente D medio o el método propuesto, y en la Figura 128, las diferencias entre los desvíos calculados y los observados, según se aplique la fórmula práctica o el método.

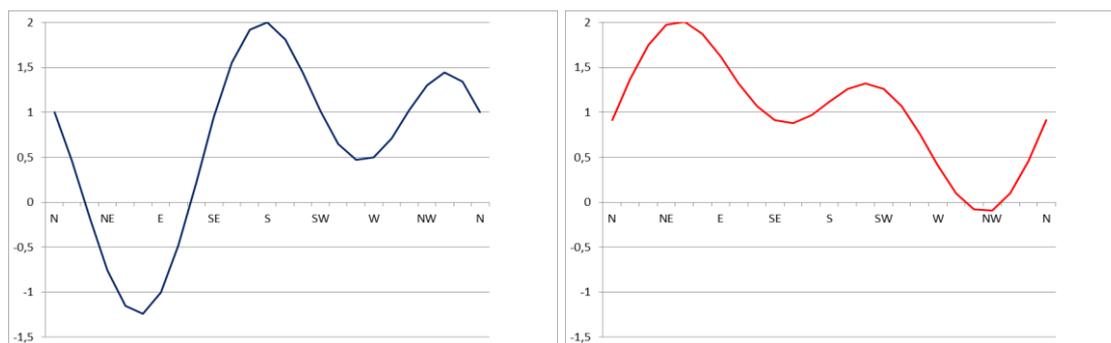


Figura 127. Desvíos residuales del buque ALLURE OF THE SEAS, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.

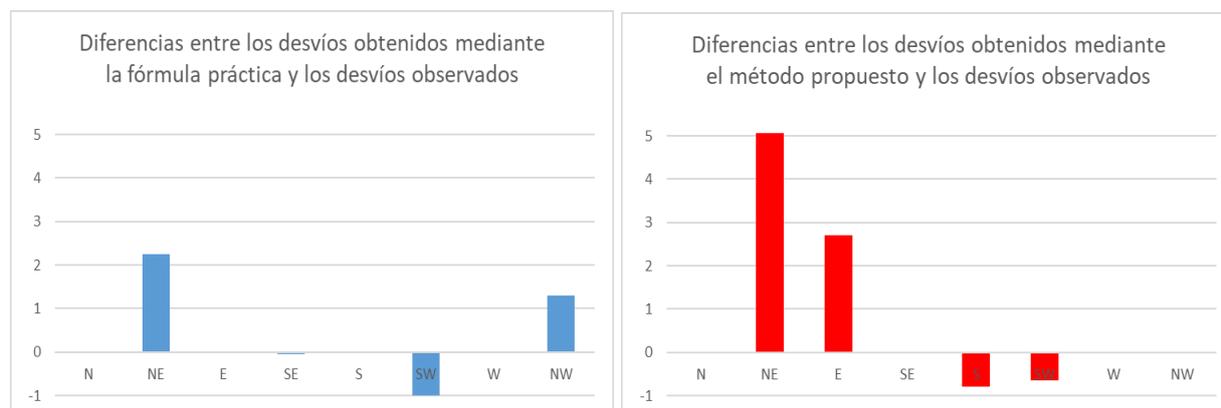


Figura 128. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque ALLURE OF THE SEAS, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

En este caso, hay una anomalía en el desvío al NE, pues todos los desvíos observados son iguales o inferiores a 2° (en valor absoluto), mientras que este es de 3°. Además, dicho desvío

está entre los desvíos de dos rumbos cardinales cuyos valores son 1 y -1 , de manera que cabría esperar que este fuera nulo o muy pequeño, en lugar de ser el mayor desvío obtenido. Asimismo, en las Figuras 94 y 95 (correspondientes también a las Figuras 63 y 64), se observa como las gráficas relativas al desvío al NE de este buque, se desajustan notablemente de las demás. Por su parte, los datos de la Tabla 61 indican que la fórmula práctica tiende a eliminar este desvío considerable, pasando de -3° a $-0,759^\circ$; es decir: introduciendo una variación de $2,241^\circ$. En cambio, el método propuesto obtiene un desvío considerable al NE (y en consecuencia, también al E), aunque no tan grande como el desvío observado, y de signo contrario. Por tanto, si bien la exactitud del método propuesto es notablemente inferior a la de la fórmula paráctica, esta última tampoco refleja el desvío real que tiene la aguja al NE. Sin embargo, tanto los desvíos obtenidos mediante la fórmula práctica, como los obtenidos mediante el método propuesto, tienen valores admisibles de acuerdo con la Norma ISO 25862. Otro aspecto a tener en cuenta es que: excepto al NE y al E, las diferencias entre el método propuesto y los desvíos observados son bastante pequeñas. En definitiva, este es un caso particular, en el cual una anomalía hace que: aunque la fórmula práctica tenga una exactitud mayor, ni esta, ni el método propuesto, dan valores que se ajusten a la anomalía. No obstante, sí que se ajustan a los demás desvíos, y por tanto, se concluye que el método da un resultado satisfactorio.

En el caso del yate TALITHA, los rumbos que se consideran para el análisis del método son: W, S, SW, NE. Y los datos obtenidos, los siguientes:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ observados	3	3,5	2	1	0,5	0,5	1,5	0
Δ fórmula práctica	3	3,561	2	0,293	0,5	1,439	1,5	1,707
Δ método propuesto	3,621	3,5	2,621	1,414	0,5	0,5	1,5	2,828
Dif. fórmula práctica	0	0,061	0	-0,707	0	0,939	0	1,707
Dif. método propuesto	0,621	0	0,621	0,414	0	0	0	2,828

Tabla 62. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque TALITHA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

En la Figura 129, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se considere la fórmula práctica con el coeficiente D medio o el método propuesto, y en la Figura 130, las diferencias entre los desvíos calculados y los observados, según se aplique la fórmula práctica o el método.

La diferencia máxima (en valor absoluto) correspondiente a la fórmula práctica es de $1,707^\circ$, mientras que la correspondiente al método propuesto es de $2,828^\circ$, ambas al NW, con una diferencia entre ellas de $1,121^\circ$. Las otras diferencias son muy parecidas: en dos casos son cero; en otro, prácticamente cero (0 y $0,061$); en dos, es más exacta la fórmula práctica, y en otros

dos, el método. Así pues, en general, la exactitud de la fórmula práctica es superior a la del método, pero no en exceso, con lo cual, se concluye que el método propuesto da un resultado satisfactorio.

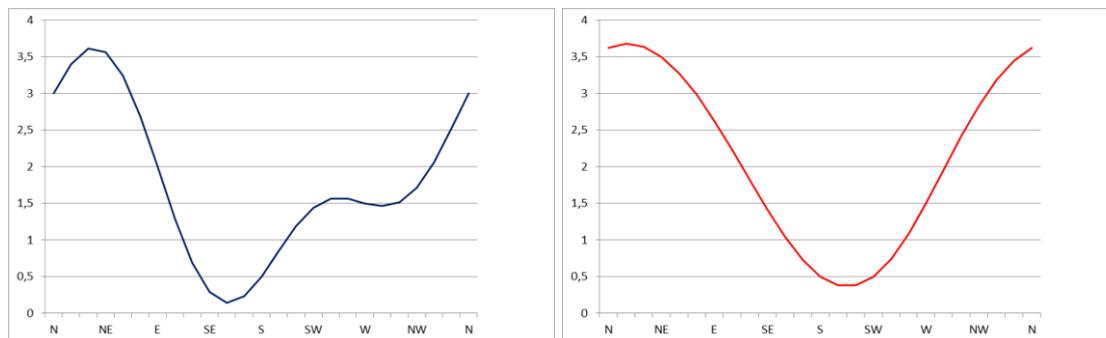


Figura 129. Desvíos residuales del buque TALITHA, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.

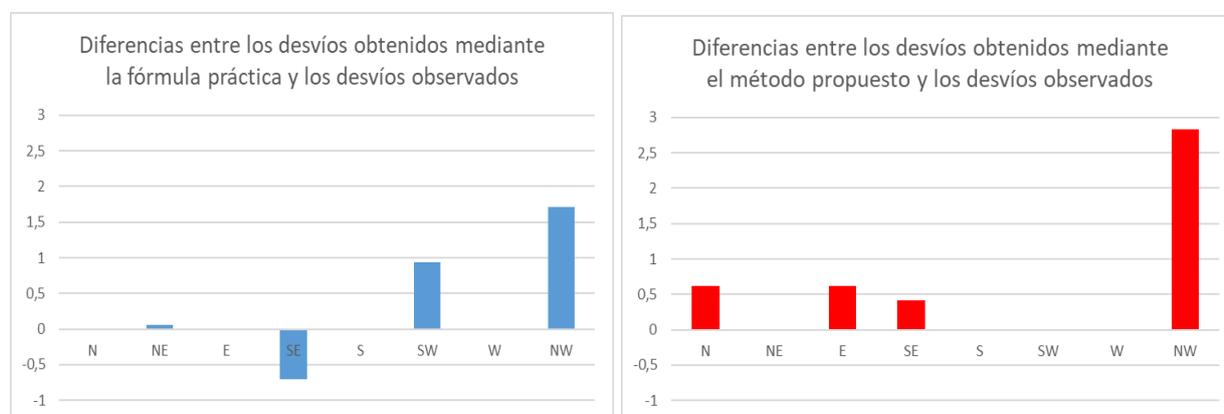


Figura 130. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque TALITHA, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

En el caso del yate MAILYN IV, los rumbos que se consideran para el análisis del método son: W, N, NW, SE. Y los datos obtenidos, los siguientes:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ observados	1,5	1,5	2,5	-2,5	-3,5	-1,5	-1,5	-2,5
Δ fórmula práctica	1,5	4,182	2,5	-1,854	-3,5	-2,182	-1,5	-1,146
Δ método propuesto	1,5	4,621	1,5	-2,5	-1,5	0,379	-1,5	-2,5
Dif. fórmula práctica	0	2,682	0	0,646	0	-0,682	0	1,354
Dif. método propuesto	0	3,121	-1	0	2	1,879	0	0

Tabla 63. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque MAILYN IV, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

En la Figura 131, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se considere la fórmula práctica con el coeficiente D medio o el método propuesto, y en la Figura 132, las diferencias entre los desvíos calculados y los observados, según se aplique la fórmula práctica o el método.

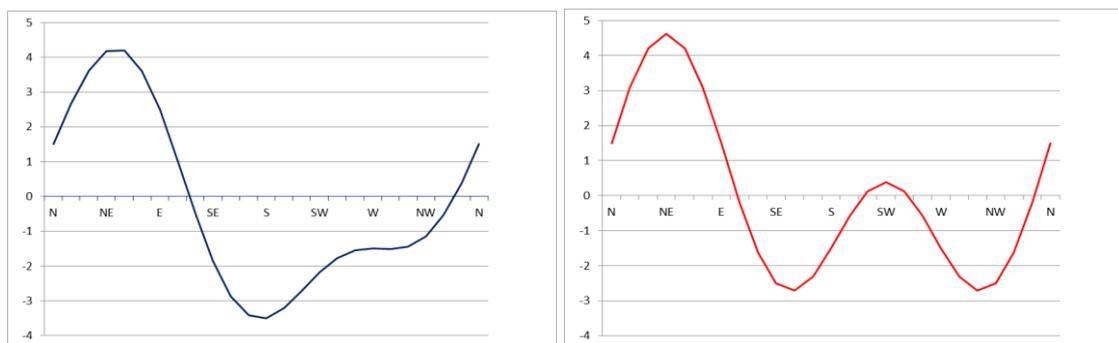


Figura 131. Desvíos residuales del buque MAILYN IV, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.

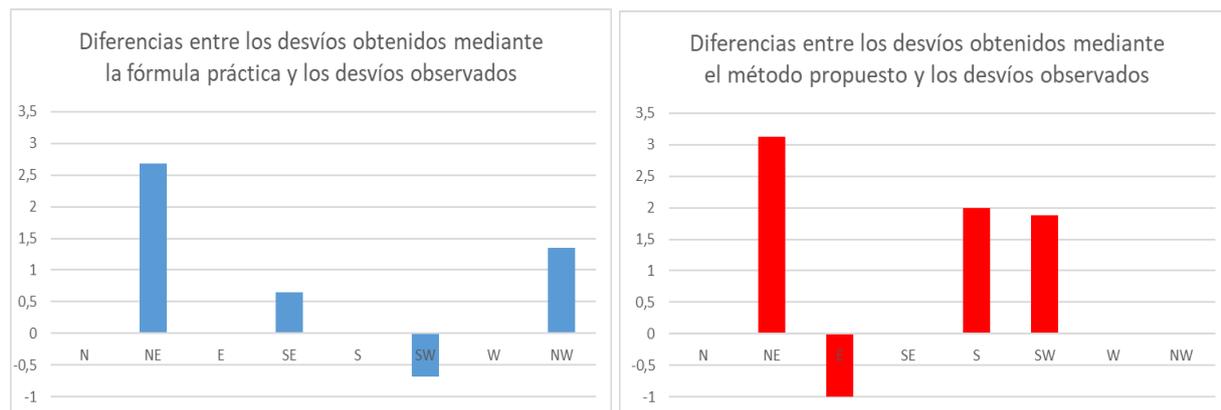


Figura 132. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque MAILYN IV, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

La diferencia máxima correspondiente a la fórmula práctica es de 2,682°, mientras que la correspondiente al método propuesto es de 3,121°, ambas al NE, con una diferencia entre ellas de 0,439°. En cambio, la máxima diferencia entre los datos de la fórmula práctica y del método, se da al SW, siendo esta de 2,561°. La exactitud de la fórmula práctica es superior a la del método, pero no en exceso. Así pues, de estos datos, se concluye que el método propuesto da un resultado satisfactorio. No obstante, cabe señalar que: aunque no afecte al análisis comparativo que se está realizando, tanto el desvío al NE obtenido mediante la fórmula práctica, como el desvío al NE obtenido por el método, no cumplen con la Norma ISO 25862.

En el caso del buque MUNDO MARINO ECO, los rumbos que se consideran para el análisis del método son: W, N, NW, SE. Y los datos obtenidos, los siguientes:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ observados	-0,5	2,5	1,5	3,5	-1,5	-0,5	0,5	-0,5
Δ fórmula práctica	-0,5	0,457	1,5	0,25	-1,5	-0,957	0,5	0,25
Δ método propuesto	-0,5	0,621	2,328	3,5	3,328	2,036	0,5	-0,5
Dif. fórmula práctica	0	-2,043	0	-3,25	0	-0,457	0	0,75
Dif. método propuesto	0	-1,879	0,828	0	4,828	2,536	0	0

Tabla 64. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque MUNDO MARINO ECO, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

En la Figura 133, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se considere la fórmula práctica con el coeficiente D medio o el método propuesto, y en la Figura 134, las diferencias entre los desvíos calculador y los observados, según se aplique la fórmula práctica o el método.

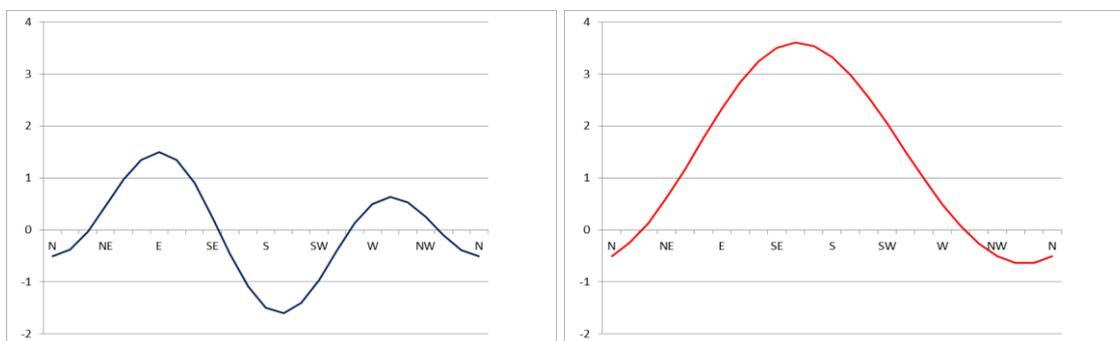


Figura 133. Desvíos residuales del buque MUNDO MARINO ECO, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.

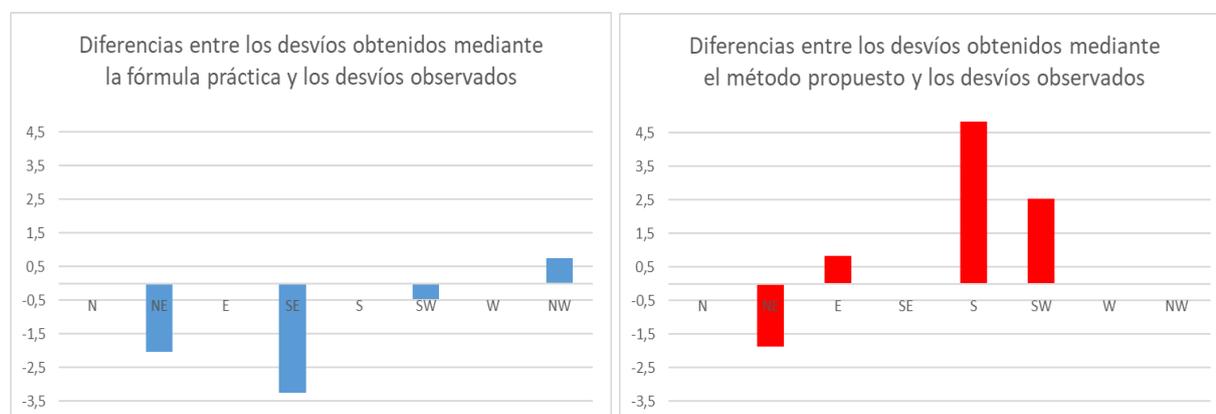


Figura 134. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque MUNDO MARINO ECO, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

La diferencia máxima (en valor absoluto) correspondiente a la fórmula práctica es de 3,25°, mientras que la correspondiente al método propuesto es de 4,828°, siendo también esta la máxima diferencia entre los datos de la fórmula práctica y del método. Asimismo, de manera análoga al Caso 3 de compensación reducida, la fórmula práctica disminuye considerablemente los desvíos más grandes que se observan a los rumbos cuadrantales. E igual que en los casos anteriores, la exactitud de la fórmula práctica es mayor que la del método, pero no en exceso. Por tanto, de estos datos, se concluye que el método propuesto da un resultado satisfactorio. En el caso del buque FLY BLUE QUATTRO, los rumbos que se consideran para el análisis del método son: E, S, SE, NW. Y los datos obtenidos, los siguientes:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ observados	0,5	1,5	-0,5	0,5	-0,5	-2,5	0,5	0,5
Δ fórmula práctica	0,5	-0,5	-0,5	-0,207	-0,5	-0,5	0,5	1,207
Δ método propuesto	-0,5	-1,5	-0,5	0,5	-0,5	-1,5	-0,5	0,5
Dif. fórmula práctica	0	-2	0	-0,707	0	2	0	0,707
Dif. método propuesto	-1	-3	0	0	0	1	-1	0

Tabla 65. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque FLY BLUE QUATTRO, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

En la Figura 135, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se considere la fórmula práctica con el coeficiente D medio o el método propuesto, y en la Figura 136, las diferencias entre los desvíos calculador y los observados, según se aplique la fórmula práctica o el método.

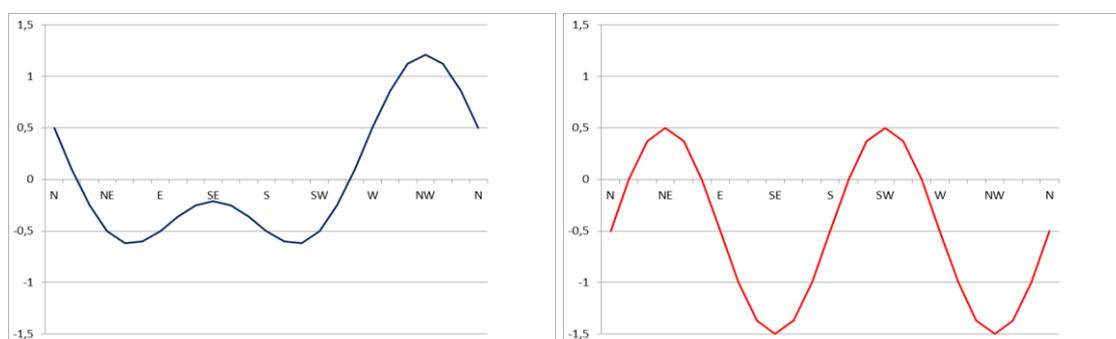


Figura 135. Desvíos residuales del buque FLY BLUE QUATTRO, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.

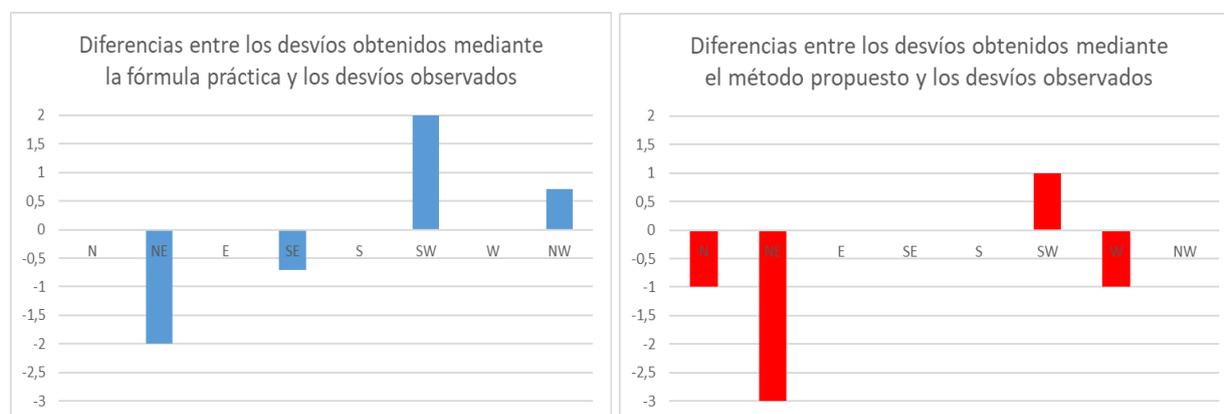


Figura 136. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque FLY BLUE QUATTRO, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

La diferencia máxima (en valor absoluto) correspondiente a la fórmula práctica es de 2°, mientras que la correspondiente al método propuesto es de 3°, aunque a todos los demás rumbos, la diferencia entre los datos del método y los observados no supera el grado. En cambio, la diferencia entre los datos de la fórmula práctica y los observados es de 2° a dos rumbos. De estos datos, se concluye que la exactitud de la fórmula práctica solo es ligeramente mayor que la del método propuesto, y por tanto, este da un resultado satisfactorio.

En el caso del buque FERRY AMAZONAS II, los rumbos que se consideran para el análisis del método son: E, S, SE, NW. Y los datos obtenidos, los siguientes:

R'	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Δ observados	1,5	3,5	-0,5	-3	-0,5	-2,5	-3	0,5
Δ fórmula práctica	1,5	1,841	-0,5	-1,323	-0,5	-1,341	-3	-1,677
Δ método propuesto	1,975	2,725	-0,5	-3	-0,5	2,725	1,975	0,5
Dif. fórmula práctica	0	-1,659	0	1,677	0	1,159	0	-2,177
Dif. método propuesto	0,475	-0,775	0	0	0	5,225	4,975	0

Tabla 66. Desvíos residuales observados; desvíos residuales calculados, y diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque FERRY AMAZONAS II, según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

En la Figura 137, se muestran las curvas de los desvíos residuales, según se considere la fórmula práctica con el coeficiente D medio o el método propuesto, y en la Figura 138, las diferencias entre los desvíos calculador y los observados, según se aplique la fórmula práctica o el método.

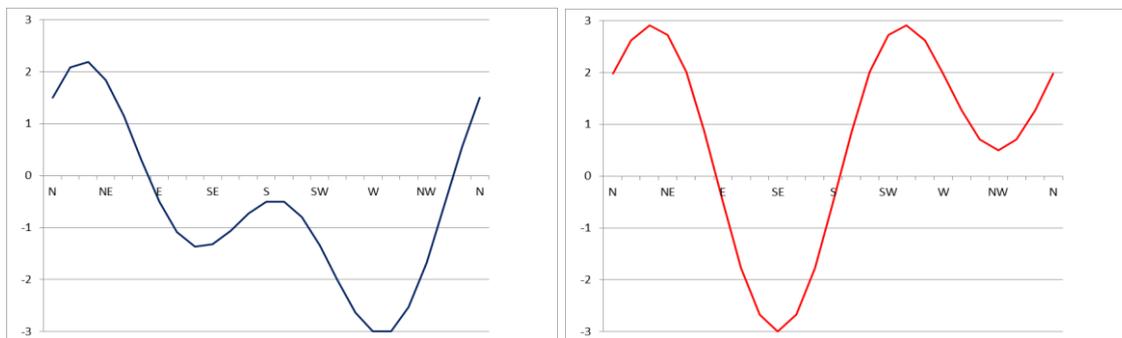


Figura 137. Desvíos residuales del buque FERRY AMAZONAS II, según se considere la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio (izda.) o el método propuesto (dcha.). Fuente: Propia.

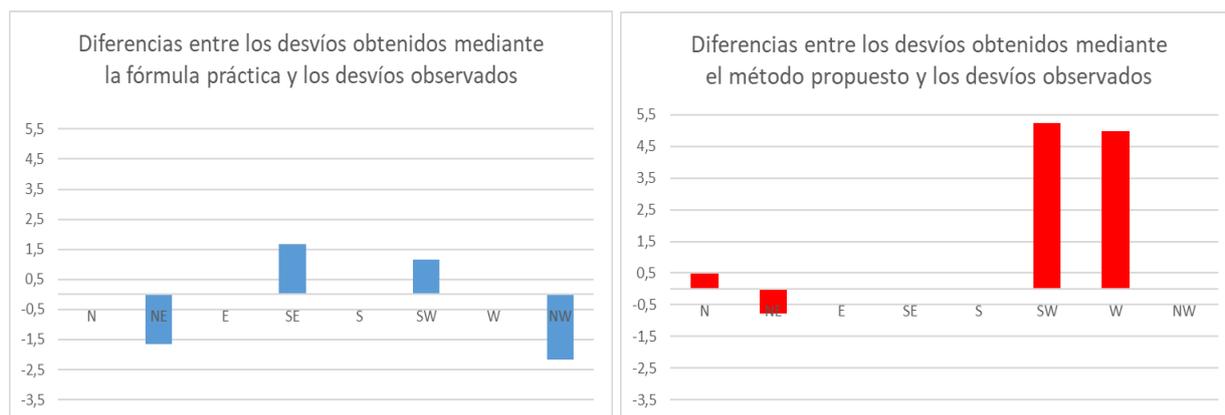


Figura 138. Diferencias entre los desvíos residuales calculados y los observados en el buque FERRY AMAZONAS II según se aplique la fórmula práctica del desvío con el coeficiente D medio o el método propuesto. Fuente: Propia.

La máxima diferencia (en valor absoluto) correspondiente a la fórmula práctica es de 2,177°, mientras que la correspondiente al método es de 5,225°. Tanto esta diferencia máxima, que se produce al SW, como la del W (4,975°), contrastan con unas diferencias muy pequeñas (todas menores de 1°) a los demás rumbos. En cambio, la fórmula práctica tiene diferencias

menores, pero a todos los rumbos cuadrantales, estas son mayores que 1° . En este caso, la mayor exactitud de la fórmula práctica se manifiesta en un *mejor reparto* de las diferencias con los datos observados. Por tanto, a pesar de estas dos diferencias considerables, el método da un resultado satisfactorio, indicando donde los desvíos tienen valores considerables, aunque con diferente signo, de manera parecida a lo que sucede en el caso del crucero Allure of the Seas.

CONCLUSIÓN

Mediante el método propuesto, se obtiene una tablilla de los desvíos residuales con una exactitud menor que la que proporciona la fórmula práctica del desvío, pero no en exceso.

Asimismo, teniendo en cuenta que:

- i) si se consideran los desvíos a los cuatro rumbos cardinales y a un cuadrantal, el coeficiente D residual puede quedar mal determinado (problemática del quinto rumbo);
- ii) si se consideran los desvíos a los ocho rumbos principales, la curva de desvíos no queda bien modulada (epígrafe IV.3.5);
- iii) una forma de subsanar el inconveniente ii) consiste en aplicar el método de ajuste por mínimos cuadrados (epígrafe III.1.2, apartados Octavo y Noveno), y
- iv) cuando se toman los ocho desvíos (bien sea que luego se aplique la fórmula práctica o el ajuste por mínimos cuadrados), si no se da un segundo borneo, los desvíos tomados antes de actuar sobre un determinado corrector, tienen un error²²;

Resulta que, mediante el método propuesto, se obtienen datos suficientemente exactos (lo que no se puede garantizar con los desvíos a cuatro rumbos cardinales y a un solo cuadrantal, o si no se da un segundo borneo) y de manera más efectiva (sin necesidad de tomar ocho desvíos, ni tener que dar dos borneos, ni tampoco tener que aplicar métodos adicionales, como el ajuste por mínimos cuadrados).

En definitiva, con el método propuesto, se obtiene una tablilla de desvíos de manera ligeramente menos eficaz que la que se obtiene a través de la fórmula práctica del desvío, pero de manera mucho más eficiente que empleando la fórmula práctica o cualquier otro método.

²² Así por ejemplo, si se anulan los desvíos al E, al N y al NE, y luego, se obtienen los otros cinco desvíos en el siguiente orden: SE, S, SW, W, NW; pero al W, se anula la mitad del desvío, resulta que los desvíos al E, al NE, al SE y al SW quedan afectados por la variación del coeficiente B. Mediante lo expuesto en el epígrafe IV.2.6, se puede obtener el nuevo valor del desvío al E, pero no el de los rumbos cuadrantales. Por tanto, o bien se da un segundo borneo para obtener los nuevos desvíos, o bien se *dejan* los desvíos cuadrantales con cierto error.

IV.4.7. Conclusión

El método propuesto permite realizar una compensación efectiva en los buques de mediano y gran porte, reduciendo el espacio requerido para llevar a cabo la compensación, así como el tiempo empleado en ella. Dicha efectividad se logra gracias a la eficiencia del método propuesto y a la eficacia de los equipos de navegación, siendo estos últimos: los compases giroscópicos o satelitales precisos para seguir los rumbos magnéticos, y las bitácoras bien instaladas y equipadas con los dispositivos correctores necesarios. Asimismo, la ligera pérdida de eficacia que el método conlleva en la compensación propiamente dicha, no supone un problema para la seguridad de la navegación, ya que la compensación no se admite si los desvíos no están dentro del margen dado por la Norma ISO 25862. En el caso de no cumplir con esta norma, no se podría aplicar el método propuesto, sino que se debería seguir el procedimiento convencional. No obstante, en agujas bien instaladas (esto es: colocadas en crujía, con la bitácora bien alineada, y manteniendo las distancias mínimas indicadas en los párrafos 8.3 y 8.4 de la Resolución A.382(X) de la OMI, *vide* anexo A.2.1) y con los dispositivos necesarios para compensar, tanto el desvío semicircular, como el cuadrantal, no cabe esperar que el método no sea aplicable.

CONCLUSIONES

De esta tesis, se extraen las siguientes conclusiones:

PRIMERA.-Se ha cumplido el primer objetivo de la tesis, consistente en realizar: un estudio completo, ordenado, sintético y actualizado de la compensación de agujas náuticas, el cual se puede aplicar a la docencia; un compendio de la normativa internacional y nacional (*vide* Anexos) , y un resumen del estado de la técnica. Cabe destacar el análisis que se ha realizado de las unidades electromagnéticas, el cual no suele tratarse en Náutica.

SEGUNDA.-Se ha demostrado que: con independencia del método empleado para compensar y para confeccionar la tablilla de los desvíos residuales, no es necesario dar un segundo borneo para obtener, de manera rigurosa, los desvíos residuales que quedan tras la compensación, lo cual supone un considerable ahorro de tiempo.

TERCERA.-Se ha desarrollado la ecuación del desvío que tiene en cuenta, además de los términos de la fórmula práctica, los *desvíos sextantal* y *octantal* (términos de la serie de Fourier que dependen del triple y del cuádruple del rumbo respectivamente) para los casos en los que las varillas asimétricas *d*, *b* tienen valores considerables, y se ha demostrado que el método habitual para compensar cuando se considera la fórmula práctica del desvío, también es válido si se considera la ecuación del desvío que tiene en cuenta los desvíos sextantal y octantal.

CUARTA.-Se ha realizado un estudio sobre la problemática del quinto rumbo; esto es: cuando se confecciona la tablilla de los desvíos residuales a partir de los cuatro desvíos a los rumbos cardinales y de un solo desvío a un rumbo cuadrantal, la experiencia muestra que, de los cuatro desvíos a los rumbos cuadrantales, siempre hay uno que se desajusta, dando un coeficiente *D* diferente del que se obtiene con cualquiera de los otros tres. Se ha demostrado que este hecho se debe a la incidencia del desvío sextantal, y que para obtener adecuadamente el coeficiente *D*, es necesario tomar, al menos, los desvíos a dos rumbos cuadrantales opuestos.

QUINTA.-Se ha constatado la utilidad de emplear la regla de Cramer para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales, tanto para obtener una mayor exactitud en la confección de la tablilla de desvíos en el caso de seguir enfilaciones que no correspondan exactamente con los rumbos magnéticos cardinales o cuadrantales, como para ser la herramienta matemática necesaria para poder desarrollar el método que permite compensar y confeccionar la tablilla de desvíos con un solo borneo de cuatro rumbos. Para el cálculo de los determinantes que requiere la regla de Cramer, resulta muy eficaz el empleo de una hoja de cálculo, la cual, además de la resolución de los determinantes propiamente dicha, realiza los cálculos propios de la compensación; obtiene las tablillas y las curvas de los desvíos residuales, y se puede adaptar fácilmente a ella, el modelo del Certificado de compensación, resultando, por tanto, una herramienta muy útil al compensador.

SEXTA.-Se ha constatado la utilidad que tiene el compás magnético integral (CMI) para la investigación, pues se ha aplicado de manera muy satisfactoria, tanto en la tesis doctoral del profesor Arribalzaga, como en esta. La obtención automática de los desvíos, así como su registro, facilita la tarea de observación y tratamiento de los datos.

SÉPTIMA.-Se ha cumplido el segundo objetivo de la tesis, consistente en mejorar la eficiencia en la compensación de agujas náuticas, aplicada a embarcaciones que solo disponen de compás magnético para indicar el rumbo verdadero (HDG). Se ha propuesto, desarrollado, analizado y verificado un método que permite confeccionar la tablilla de los desvíos residuales comparando los rumbos de aguja con los efectivos (COG) que indica el GPS, una vez se han anulado los desvíos a dos enfilaciones coincidentes o próximas a rumbos magnéticos cardinales separados 90°. Este método permite realizar una compensación rigurosa sin necesidad de seguir un mínimo de cinco enfilaciones (cuatro coincidentes o próximas a los rumbos magnéticos cardinales y una a un rumbo cuadrantal), o de tomar y calcular los azimutes del sol, a fin comparar los azimutes de aguja con los verdaderos a los diferentes rumbos.

OCTAVA.- Se ha cumplido el segundo objetivo de la tesis, consistente en mejorar la eficiencia en la compensación de agujas náuticas, aplicada a buques de mediano y gran porte, los cuales están equipados con compases giroscópicos o satelitales precisos para poder seguir los rumbos magnéticos que requiere el proceso de compensación (ajuste del compás y confección de la tablilla de los desvíos residuales). En este caso, se ha planteado, desarrollado, analizado y verificado un método que permite realizar todo el proceso de compensación mediante un solo borneo de cuatro rumbos, con el consiguiente ahorro de tiempo que esto supone, aparte del menor espacio requerido para llevar a cabo el todo el proceso, puesto que dicho proceso suele consistir en: un primer borneo de seis rumbos para compensar y un segundo de ocho para obtener los desvíos residuales, o sea, un total de trece rumbos (el último rumbo del primer borneo coincide con el primer rumbo del segundo borneo), o bien un borneo a los ocho rumbos principales si no es necesario reajustar ningún corrector.

NOVENA.-Para poder emplear el GPS en la compensación, se requiere que el buque navegue a una velocidad elevada. Concretamente, la relación entre la velocidad propia del buque y la intensidad horaria de la corriente (*Drift*) debe ser igual o superior a 8. A modo de orientación, para una corriente (*Drift*) de 1 nudo, la velocidad mínima del buque debe ser de 8 nudos. No obstante, sigue siendo necesario seguir dos enfilaciones próximas a rumbos magnéticos cardinales separados 90° para anular los desvíos a ellas. Pero asimismo, a medida que aumenta la velocidad del buque, la exactitud del método es mayor. Por tanto, queda abierta una investigación acerca de una velocidad mínima a partir de la cual se pudiera realizar toda la compensación solo con GPS (sin seguir enfilaciones) y garantizando una exactitud suficiente.

**ANEXOS: NORMATIVA SOBRE LA
COMPENSACIÓN DE AGUJAS NÁUTICAS**

A.1. Fundamento

El fundamento del uso del compás magnético y de su compensación, a día de hoy, se encuentra en el Convenio SOLAS, en la regla 19 del Capítulo V. Esta regla reemplaza la regla 12 del anterior Capítulo V, a la cual hace referencia la normativa previa a la entrada en vigor de la versión revisada del Capítulo V en virtud de la Resolución MSC.99(73) de la OMI. Dicha regla V/19, titulada: *Prescripciones relativas a los sistemas y aparatos náuticos que se han de llevar a bordo*, en sus apartados 2.1.1 y 2.2.1, establece la obligatoriedad de llevar compases magnéticos a bordo, así como de tenerlos debidamente compensados:

2. Aparatos y sistemas náuticos de a bordo

2.1. Todo buque, independientemente de su tamaño, tendrá:

2.1.1. *un compás magistral magnético debidamente compensado u otro medio, independiente de cualquier suministro de energía, para determinar el rumbo del buque y presentar los datos visualmente en el puesto principal de gobierno; [...]*

2.2. *Todos los buques de arqueo bruto igual o superior a 150 y los buques de pasaje, independientemente de su tamaño, además de lo prescrito en el párrafo 2.1, estarán equipados con:*

2.2.1. *un compás magnético de respeto, intercambiable con el compás magnético a que se hace referencia en el párrafo 2.1.1, u otro medio para desempeñar la función especificada en el párrafo 2.1.1 mediante un aparato auxiliar o duplicado; [...]*

Adicionalmente, el párrafo 2.1 también prescribe:

2.1.2. *un taxímetro, un dispositivo para leer demoras u otro medio, independiente de cualquier suministro de energía, para obtener demoras en un arco de horizonte de 360°;*

2.1.3. *medios para corregir y obtener el rumbo y la demora verdaderos; [...]*

Estas prescripciones genéricas se complementan con una normativa más detallada, parte de la cual es anterior a la versión revisada del Capítulo V. No obstante, se observa que la regla V/19 únicamente establece la obligatoriedad del compás magnético y de su compensación, dejando las especificaciones de los compases y de su compensación a otra normativa concreta, que es la que se ha recopilado en estos Anexos. Por tanto, no hay controversia entre el fundamento sustantivo de la regla V/19 y el hecho de que se disponga de una normativa previa para su desarrollo.

Una situación similar se da en la normativa española, donde la actividad de la compensación de agujas náuticas está regulada por la Orden del Ministerio de Obras Públicas y Transporte de 14 de diciembre de 1992. El preámbulo de esta Orden, aparte de hacer referencia a las resoluciones de la OMI, especifica: *El fundamento sustantivo de esta Orden, aparte del Convenio Internacional citado [SOLAS], se halla en el artículo 574 del Código de Comercio,*

que ordena a los navieros y gente de mar que se sujeten a lo que las leyes y reglamentos de la Administración Pública dispongan, entre otras cuestiones, sobre navegación, seguridad de las naves y demás objetos análogos. Sin embargo, el Libro IV del Código de Comercio, en el que se encuentra el artículo mencionado, está derogado por la Ley 14/2014, de 24 de julio, de navegación marítima. Pero no por ello, la Orden queda derogada ni pierde su fundamento. En cualquier caso, la propia Orden puede devenir el fundamento de la actividad de compensación de agujas náuticas en España.

En este mismo sentido, el preámbulo de la Orden también se fundamenta en el Convenio SOLAS, diciendo en su inicio: *La Regla V/12 del Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar, hecho en Londres el 1 de noviembre de 1974 y ratificado por España mediante Instrumento de Ratificación de 16 de agosto de 1978, en su forma enmendada, dispone que todos los buques deben ir provistos de un compás magnético que estará debidamente compensado y que su tablilla o curva de desvíos residuales estará disponible en todo momento.* Luego, de igual manera que sucede con el fundamento del Código de Comercio, la regla V/12 del SOLAS a la que hace referencia, forma parte del anterior Capítulo V. No obstante, el contenido viene a ser el mismo que el de los párrafos citados de la regla V/19 del Capítulo actual.

En definitiva, se pueden considerar las siguientes normas como fundamento sustantivo:

- A nivel internacional, los párrafos 2.1.1 y 2.2.1 de la regla V/19 del Convenio SOLAS.
- A nivel nacional, la Orden del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de 14 de diciembre de 1992 sobre compensación de agujas náuticas.

Asimismo, la normativa que desarrolla la actividad de la compensación es la siguiente:

- Resolución A.382(X) de la OMI: *Compases magnéticos: emplazamiento a bordo y normas de rendimiento*, aprobada el 14 de noviembre de 1977, la cual hace referencia a la regla V/12 del anterior Capítulo V del Convenio SOLAS.
- ISO Standard 25862:2019: *Ships and marine technology: marine magnetic compasses, binnacles and azimuth reading devices*. Esta Norma deroga y reemplaza las siguientes: ISO 449:1997, ISO 613:2000, ISO 694:2000, ISO 2269:1992, ISO 10316:1990 e ISO 25862:2009.
- SOLAS, Annex V/13: *Magnetic compasses*; Annex V/20: *Inspection and survey of navigational equipment*, Section 5: *Magnetic compasses*; de aplicación en el Reino Unido.

Además, las siguientes publicaciones establecen los requisitos mínimos para la formación:

- Convenio STCW 95/2010: Código de Formación, Parte A, Tabla A-II/1.
- Master and chief mate (IMO model course 7.01). 2014 Edition. Parts C, D, paragraphs 1.3.1.1: *The parts of the magnetic compass and their function* (3h); 1.3.1.2: *The errors of the magnetic compass and their correction* (27h).

A.2. Compendio de normativa

A.2.1. Resolución A.382(X) de la OMI

El contenido de esta Resolución de la OMI establece los principios a tener en cuenta sobre emplazamiento y rendimiento de los compases magnéticos, entre los cuales, se encuentran los que hacen referencia a la compensación. Así pues, esta Resolución es una norma básica en materia de compensación de agujas náuticas, a la vez que también marca la pauta para el desarrollo de posteriores normas dirigidas a esta actividad.

RESOLUCIÓN A.382(X): COMPASES MAGNÉTICOS: EMPLAZAMIENTO A BORDO Y NORMAS DE RENDIMIENTO. Aprobada 14 noviembre, 1977. Punto 8 b) del orden del día
LA ASAMBLEA,

CONSIDERANDO el Artículo 16 i) de la Convención constitutiva de la Organización Consultiva Marítima Intergubernamental, el cual trata de las funciones de la Asamblea,

CONSIDERANDO lo dispuesto en la Regla 12 del Capítulo V del Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar, 1974,

CONSIDERANDO el Informe del Comité de Seguridad Marítima correspondiente a su trigésimo segundo periodo de sesiones, en relación con las enmiendas a las disposiciones de la Convención internacional para la seguridad de la vida humana en el mar, 1960,

CONSIDERADO el Informe del Comité de Seguridad Marítima correspondiente a su trigésimo cuarto periodo de sesiones,

RESUELVE:

- a) aprobar la Recomendación sobre el emplazamiento a bordo de compases magnéticos, constitutiva del Anexo I de la presente Resolución;
- b) aprobar la Recomendación sobre normas de rendimiento de los compases magnéticos, constitutiva del Anexo II de la presente Resolución;
- c) recomendar a los Gobiernos Miembros que den efectividad a las disposiciones de la presente resolución y sus Anexos y hagan que los compases magnéticos instalados después de la aprobación de la presente Resolución cumplan con normas de rendimiento no inferiores a las consignadas en el Anexo II de la presente Resolución,

INVITA a los Gobiernos a que oportunamente presenten una propuesta de enmienda a la Regla 12 del Capítulo V del Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar, 1974, que lleve incorporadas las disposiciones del Anexo I de la presente Resolución.

ANEXO I

RECOMENDACIÓN SOBRE EL EMPLAZAMIENTO A BORDO DE COMPASES MAGNÉTICOS

Se recomienda a los Gobiernos Miembros que se aseguren de que:

1. Todos los buques van dotados de:

- a) un compás magnético magistral, tal como este queda definido en el Anexo II;
- b) un compás magnético de gobierno, tal como este queda definido en el Anexo II, a menos que la información sobre rumbo dada por el compás magistral prescrito en el apartado a) le sea facilitada en forma claramente legible al timonel que se halle en el puesto de gobierno principal;
- c) medios adecuados de comunicación, que la Administración habrá de hallar satisfactorios, entre el puesto de emplazamiento del compás magistral y el puesto normal de control de la navegación.

2. Se lleva a bordo un compás magnético de respeto, intercambiable con el compás magistral, salvo que el buque lleve el compás de gobierno mencionado en el apartado 1 b) o un girocompás.

3. Todo compás magnético está compensado adecuadamente y que en todo momento se dispone a bordo, próximas al compás, de su tablilla o curva de desvíos residuales.

Nota: Si la Administración no considera razonable o necesario exigir un compás magnético magistral podrá eximir a cualquier buque de las presentes prescripciones si la naturaleza del viaje, la proximidad del buque a tierra o el tipo de buque no justifican la necesidad de un compás magistral, a condición de que en todos los casos se prescriba un adecuado compás de gobierno.

ANEXO II

RECOMENDACIÓN SOBRE NORMAS DE RENDIMIENTO DE LOS COMPASES MAGNÉTICOS

1. *Definiciones*

1.1. El compás magnético es un instrumento concebido de modo que tienda a señalar cierta dirección azimutal y a mantenerla permanentemente, y cuyas propiedades direccionales dependen del magnetismo de la Tierra.

1.2. El compás magistral es un compás magnético que se utiliza para la navegación, montado en una bitácora adecuada que contiene los necesarios dispositivos compensadores y dotado de un dispositivo apropiado de lectura azimutal.

1.3. El compás de gobierno es un compás magnético empleado para el gobierno del buque, montado en una bitácora adecuada que contiene los necesarios dispositivos compensadores.

Nota: Si la imagen transmitida de un sector de la rosa náutica del compás magistral que se extienda al menos 15° a cada lado de la línea de fe es claramente legible a fines de gobierno en

el puesto principal de gobierno, tanto con luz diurna como con luz artificial ajustada a lo dispuesto en el párrafo 7.1, el compás magistral podrá considerarse también como el compás de gobierno.

2. *Rosa náutica*

2.1. La rosa náutica deberá estar dividida en 360 grados. Cada diez grados, partiendo del Norte (000°) en el sentido de las agujas del reloj, hasta 360°, habrá una indicación numérica. Los puntos cardinales se indicarán por las mayúsculas N, E, S y W. Para indicar el punto Norte se podrá utilizar también un símbolo adecuado.

2.2. El error direccional de la rosa náutica, compuesto por inexactitudes de graduación, la excentricidad de la rosa en relación a su centro de giro y su defecto de orientación con respecto al sistema magnético, no deberá exceder de 0,5° en ninguna dirección.

2.3. La rosa náutica del compás de gobierno deberá ser claramente legible con luz diurna y con luz artificial a una distancia de 1,4 m. Está permitido utilizar una lente de aumento.

3. *Materiales*

3.1. Los imanes empleados en el sistema direccional y los imanes compensadores destinados a corregir los campos magnéticos permanentes del buque tendrán una coercividad alta; lo menos de 11,2 kA/m.

3.2. Los materiales empleados para corregir los campos inducidos tendrán una remanencia y una coercividad bajas.

3.3. Todos los demás materiales empleados en el compás magnético y en la bitácora serán amagnéticos, en la medida en que esto sea razonable y posible, y de una naturaleza tal que la desviación de la rosa ocasionada por ellos no exceda de $(9/H)^\circ$, donde H es el componente horizontal de la densidad del flujo magnético en μT (microteslas) en el sitio en que se halle el compás.

4. *Funcionamiento*

El equipo constitutivo del compás magnético deberá funcionar satisfactoriamente y ser utilizable en las condiciones operacionales y ambientales que puedan darse a bordo de los buques en que está instalado.

5. *Error de construcción*

5.1. Con el compás girando a una velocidad uniforme de 1,5° por segundo y a una temperatura del compás de $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ la desviación de la rosa no excederá de $(36/H)^\circ$, si el diámetro de la rosa es inferior a 200 mm. Si este diámetro es igual o superior a 200 mm, la desviación de la rosa no excederá de $(54/H)^\circ$, donde H se define como en el párrafo 3.3.

5.2. El error debido al rozamiento, a una temperatura de $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 3\text{ }^\circ\text{C}$, no excederá de $(3/H)^\circ$, donde H se define como en el párrafo 3.3.

5.3. Con un componente horizontal del campo magnético de $18 \mu\text{T}$ el semiperiodo de la rosa náutica será al menos de 12 segundos²³ después de una desviación inicial de 90° . El tiempo invertido en regresar al meridiano magnético con discrepancia máxima de $\pm 1^\circ$ no excederá de 60 segundos después de una desviación inicial de 90° . Los compases aperiódicos solo tendrán que cumplir con lo prescrito en último lugar.

6. *Dispositivos compensadores*

6.1. La bitácora irá provista de dispositivos con los que compensar las desviaciones semicircular y cuadrantal debidas:

- a) a los componentes horizontales del magnetismo permanente del buque;
- b) al error provocado por la escora;
- c) al componente horizontal del magnetismo horizontal inducido;
- d) al componente horizontal del magnetismo vertical inducido.

6.2. Los dispositivos compensadores prescritos en el párrafo 6.1 asegurarán que no se produzcan cambios importantes de desviación a causa de las condiciones señaladas en el párrafo 4 y especialmente una alteración considerable de la latitud magnética. Las desviaciones sextantal y las de mayor orden deberán ser insignificantes.

7. *Construcción*

7.1. Se instalarán medios de iluminación principal y de emergencia que permitan leer la rosa náutica en todo momento, así como dispositivos para atenuar la luz.

7.2. Salvo en lo que respecta a la iluminación, para el funcionamiento del compás magnético no se necesitará suministro de energía eléctrica.

7.3. Cuando una reproducción eléctrica de la indicación del compás magistral esté considerada como compás de gobierno, el sistema transmisor irá provisto de suministro de energía eléctrica principal y de emergencia.

7.4. El equipo estará construido e instalado de modo que resulte fácilmente accesible a fines de corrección y mantenimiento.

7.5. El compás, la bitácora y el dispositivo de lectura azimutal irán marcados de un modo que la Administración juzgue satisfactorio.

7.6. El compás magistral llevará suspensión cardán, de manera que el anillo de fijación permanezca horizontal con la bitácora inclinada en una dirección cualquiera hasta 40° y que el compás no pueda salirse de su alojamiento sea cual fuere el estado del mar o del tiempo. Los compases de gobierno con suspensión cardán cumplirán con las mismas prescripciones. Si no

²³ De acuerdo con el final del epígrafe I.1.7, para otro lugar de componente H, el semiperiodo mínimo (T) debe cumplir que: $T^2/12^2 = 18/H$, o sea: $T^2 = 12^2 \cdot 18/H$; $T = 12 \cdot 3 \cdot \sqrt{2}/\sqrt{H} = 50,9/\sqrt{H}$. Así por ejemplo, en un lugar donde $H = 25 \mu\text{T}$, el semiperiodo será al menos de: $50,9/\sqrt{25} = 50,9/5 = 10,18 \text{ s}$.

llevan esa suspensión permitirán que la rosa náutica se mueva al menos 30° en cualquier dirección.

7.7. Los materiales empleados en la fabricación de compases magnéticos tendrán resistencia suficiente y serán satisfactorios a juicio de la Administración.

8. *Emplazamiento*

8.1. El compás magnético se instalará, si ello es posible y razonable, en el eje longitudinal del buque. La línea de fe principal indicará el rumbo del buque con una precisión de ± 0,5°.

8.2. El compás magistral se instalará de manera que desde su emplazamiento la visión sea lo más ininterrumpida posible, a efectos de tomar demoras y azimutes. El compás de gobierno será claramente visible para el timonel desde el puesto de gobierno principal.

8.3. Los compases magnéticos se instalarán lo más lejos posible del material magnético.

Las distancias mínimas entre el compás magistral y el material magnético que forma parte de la estructura del buque serán satisfactorias a juicio de la Administración. En el diagrama dado a continuación aparece una orientación general en cuanto a las distancias mínimas que, según lo que se juzga conveniente, deberán mediar desde el compás magistral.

Las distancias mínimas convenientes para el compás de gobierno podrán reducirse al 65 por ciento de los valores indicados en el diagrama, a condición de que ninguna distancia sea inferior a 1 m. Si solo hay un compás de gobierno, en la medida de lo posible se aplicarán las distancias mínimas que rigen para el compás magistral.

8.4. La distancia entre el compás magnético y el equipo eléctrico o magnético será como mínimo igual a la distancia especificada como de seguridad para el equipo y la que a juicio de la Administración sea satisfactoria.

Diagrama: Distancias mínimas convenientes desde el compás magistral

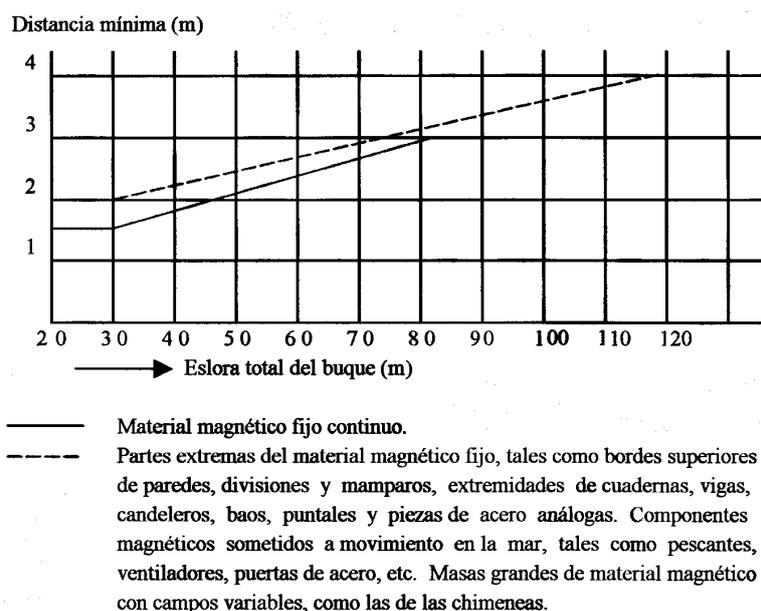


Figura 139. Diagrama: Distancias mínimas convenientes desde el compás magistral. Fuente: Propia.

A.2.2. Normativa española: Orden del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de 14 de diciembre de 1992 sobre compensación de agujas náuticas

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES

ORDEN de 14 de diciembre de 1992 sobre compensación de agujas náuticas

La Regla V/12 del Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar, hecho en Londres el 1 de noviembre de 1974 y ratificado por España mediante Instrumento de Ratificación de 16 de agosto de 1978, en su forma enmendada, dispone que todos los buques deben ir provistos de un compás magnético que estará debidamente compensado y que su tablilla o curva de desvíos residuales estará disponible en todo momento.

La Orden del Ministerio de Industria y Comercio de 11 de marzo de 1950 sobre compensación de agujas náuticas, se limitó a determinar las personas que debían llevar a cabo la compensación de las agujas náuticas de un buque cuando ello fuera preciso.

Dado el tiempo transcurrido desde entonces, y considerando las sucesivas resoluciones de la Asamblea de la Organización Marítima Internacional que instan a los Gobiernos a hacer efectivas las recomendaciones sobre las operaciones de compensación, es necesario regular esta actividad náutica, determinando la cualificación profesional que han de poseer las personas que vayan a realizar dichas operaciones y la formación específica que han de recibir para la obtención del certificado de aptitud que les habilite para su ejercicio, las funciones propias del compensador de agujas náuticas y la expedición y condiciones de validez de los certificados acreditativos de las compensaciones realizadas por los habilitados para ello.

El fundamento sustantivo de esta Orden, aparte del Convenio Internacional citado, se halla en el artículo 574 del Código de Comercio, que ordena a los navieros y gente de mar que se sujeten a lo que las leyes y reglamentos de la Administración Pública dispongan, entre otras cuestiones, sobre navegación, seguridad de las naves y demás objetos análogos. La competencia para su regulación viene atribuida al Ministerio de Obras Públicas y Transportes, en virtud de lo dispuesto en el artículo 2º del Real Decreto 1661/1982, de 25 de junio, que faculta a este Departamento para establecer las normas de aplicación de los preceptos del Convenio Internacional sobre Seguridad de la Vida Humana en el Mar y de su Protocolo modificativo de 17 de febrero de 1978.

En su virtud, dispongo:

Primero. *Objeto.*—Esta Orden tiene por objeto la determinación de la formación específica exigible para realizar la actividad de compensación de las agujas náuticas, la expedición del certificado de aptitud necesario para ello, las funciones del compensador y el modo de acreditar los procesos de compensación efectuados y las condiciones necesarias para su validez.

Segundo. *Definiciones.*—A los efectos de esta Orden se entiende por:

- a) Compás magnético: Es un instrumento concebido de modo que tienda a señalar cierta dirección azimutal y a mantenerla permanentemente, y cuyas propiedades direccionales dependen del magnetismo de la Tierra.
- b) Compás magistral: Es un compás magnético que se utiliza para la navegación, montado en una bitácora adecuada que contiene los necesarios dispositivos compensadores y dotado de un dispositivo apropiado de lectura azimutal.
- c) Compás de gobierno: Es un compás magnético empleado para el gobierno del buque, montado en una bitácora adecuada que contiene los necesarios dispositivos compensadores.
- d) Aguja magnética: Es un compás magistral o de gobierno, tal y como estos se definen en los apartados b) y c) anteriores.
- e) Dispositivos compensadores: Elementos instalados en la bitácora y utilizados para compensar las desviaciones semicircular y cuadrantal debidas a los componentes horizontales del magnetismo permanente del buque, al error provocado por la escora, y a los componentes horizontales de los magnetismos horizontal y vertical inducidos.
- f) Compensador: Persona física en posesión del certificado de aptitud previsto en esta Orden y capacitado para ejercer la actividad de compensación de agujas náuticas.

Tercero. *Curso de formación específica.*—1. Para poder desempeñar la actividad de compensación de agujas náuticas será necesaria la realización y superación de un curso de formación específica y estar en posesión del correspondiente Certificado de Aptitud de Compensador.

2. El curso de formación específica tendrá una duración mínima de treinta horas lectivas y en él se impartirán enseñanzas teórico-prácticas sobre las siguientes materias:

- a) La figura del Compensador.
- b) Idea general del magnetismo terrestre.
- c) Agujas magnéticas.
- d) Estudio de los desvíos.
- e) Corrección de los desvíos.
- f) Método para compensar.
- g) Formación de una tablilla de desvíos.

3. Podrán realizar el curso de formación para la obtención del Certificado de Compensador los españoles o nacionales de otros Estados Miembros de la Comunidad Europea o de terceros Estados que estén en posesión del título de Licenciado o Doctor en Náutica y Transportes Marítimos, o equivalente, expedido en España, o de la titulación superior equivalente a aquella debidamente homologada por la Administración española.

Cuarto. *Centros que pueden impartir los cursos de formación.*–1. Podrán impartir los cursos de formación para la obtención del Certificado de Aptitud de Compensador tanto los Centros públicos como privados, previa autorización de la Dirección General de la Marina Mercante.

En el caso de los Centros privados, la autorización se otorgará una vez que el Centro solicitante acredite que dispone de los medios humanos y materiales idóneos para la celebración de los cursos.

En todo caso, la Dirección General de la Marina Mercante podrá inspeccionar el funcionamiento de estos Centros, tanto públicos como privados, al objeto de controlar el desarrollo de los cursos y su adecuación a las exigencias de formación y profesionalidad necesarios para el ejercicio de las funciones de compensación de agujas náuticas.

2. No obstante lo dispuesto en el número anterior, si los cursos de formación fueran impartidos por las Universidades, la autorización para organizar e impartir los cursos y el control de su desarrollo y calidad de la enseñanza se efectuará de conformidad con el régimen especial de cooperación que se acuerde entre aquellas y la Dirección General de la Marina Mercante.

Quinto. *Certificado de Aptitud de Compensador.*–Aquellos titulados que hayan superado el curso de formación obtendrán el Certificado de Aptitud de Compensador de Agujas Náuticas, que será expedido por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, a través de la Dirección General de la Marina Mercante, previa acreditación documental de la titulación requerida en el número 3 del apartado tercero de esta Orden, y que les facultará para ejercer todas las funciones propias de esta actividad.

Sexto. *Funciones de los Compensadores.*–Corresponderá a los Compensadores de agujas náuticas el ejercicio de las siguientes funciones:

- a) Dirigir el desarrollo de las operaciones de compensación de compases magistrales o de gobierno instalados a bordo de los buques, de conformidad con la Regla V/12 del Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar.
- b) Realizar los cálculos precisos y actuar sobre los dispositivos compensadores de los compases magistrales o de gobierno en la forma precisa para realizar la compensación de los mismos.
- c) Valorar la necesidad de realizar o no el proceso completo de compensación.

Este proceso no podrá omitirse, en ningún caso, si hubieran transcurrido más de dos años desde la última compensación, se hubieran realizado reparaciones o alteraciones de importancia en construcción del buque o en partes de naturaleza magnética, o si el buque hubiera permanecido atracado en un mismo rumbo durante un período superior a seis meses.

En todo caso, el compensador deberá realizar igualmente el proceso completo de compensación si a resultas de una inspección, revisión o reconocimiento por la Inspección de Seguridad Marítima de una Capitanía Marítima, se hubiera determinado dicha necesidad.

d) Certificar los desvíos obtenidos durante el proceso de compensación, según el modelo que figura como anexo de esta Orden.

Séptimo. *Certificaciones de compensación.*—Todo proceso de compensación que se realice deberá acreditarse mediante la expedición de la correspondiente certificación firmada por el Compensador de Agujas Náuticas con el conforme del Capitán o Patrón del buque. Estas certificaciones deberán ser firmadas y selladas por el Capitán marítimo que corresponda, sin cuyo requisito carecerán de validez para acreditar el proceso de compensación ante cualquier inspección o reconocimiento por parte de las Autoridades marítimas.

Octavo. *Disposición transitoria.*—Quienes a la entrada en vigor de esta Orden vinieran realizando operaciones de compensación de agujas náuticas, podrán continuar ejerciendo esta actividad y solicitar de la Dirección General de la Marina Mercante del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, durante un plazo de seis meses, la expedición del correspondiente Certificado de Aptitud de Compensador, el cual les será otorgado siempre que acrediten el ejercicio continuado de esta actividad desde al menos dos años antes de la entrada en vigor de esta Orden.

Dicho extremo será acreditado mediante la oportuna certificación expedida por la Capitanía Marítima correspondiente.

Noveno. *Disposición derogatoria.*—Queda derogada la Orden del Ministerio de Industria y Comercio de 11 de marzo de 1950, sobre compensación de agujas náuticas.

Décimo. *Habilitación al Director general de la Marina Mercante.*—Se faculta al Director general de la Marina Mercante para dictar las resoluciones necesarias para el cumplimiento de esta Orden, en particular para desarrollar y especificar el contenido de las materias objeto del curso de formación, así como para establecer la cualificación académica y profesional que deba poseer el profesorado que imparta tales cursos.

Undécimo. *Entrada en vigor.*—Esta Orden entrará en vigor el día siguiente al de su publicación en el «Boletín Oficial del Estado».

Madrid, 14 de diciembre de 1992

BORRELL FONTELLES

Ilmos. Sres. Secretario general para los Servicios de Transportes y Director general de la Marina Mercante

(«BOE» 8 enero 1993)

ANEXO

CERTIFICADO DE COMPENSACION DE AGUJAS NAUTICAS

D.....en posesión del Certificado de Aptitud de Compensador de Aguja Náutica registrado bajo el número.....

CERTIFICA:

Que al buque.....
 Señal distintiva Folio de la.....Lista de..... se le ha procedido a efectuar la compensación de la aguja magnética de acuerdo con la Orden del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de fecha , anotándose los datos obtenidos en la tablilla de desvíos que figura al dorso.

Dado en....., a.....de.....mil novecientos noventa y.....

VºBº
 El Capitán Marítimo

Conforme:
 El Capitán o Patrón del Buque

(firma y sello)

TABLILLA DE DESVIOS

Rumbos de aguja	Desvíos	Rumbos de aguja	Desvíos
0º (N)		180º (S)	
015º (N15E)		195º (S15W)	
030º (N30E)		210º (S30W)	
045º (N45E)		225º (S45W)	
060º (N60E)		240º (S60W)	
075º (N75E)		255º (S75W)	
090º (E)		270º (W)	
05º (S75E)		285º (N75W)	
120º (S60E)		300º (N60W)	
135º (S45E)		315º (N45W)	
150º (S30E)		330º (N30W)	
165º (S15E)		345º (N15W)	

Figura 140. Modelo español de Certificado de compensación de agujas náuticas. Fuente: «BOE» 8 enero 1993.

A.2.3. Norma ISO 25862:2019. Anexo G: Compensación del compás magnético**G1. General**

Un compás correctamente compensado tendrá un desvío residual máximo de 3° en buques con una eslora de 82,5 metros o más, y de 4° en buques con una eslora de menos de 82,5 metros. Las precisiones deberán estar dentro de 2° para una navegación segura.

G2. Cuándo compensar el compás

Los compases magnéticos se compensarán cuando:

- a) se instalen por primera vez;
- b) se conviertan en poco fiables;
- c) se hayan llevado a cabo reparaciones o alteraciones estructurales en el buque que puedan afectar a su magnetismo permanente y/o inducido;
- d) se añadan, se supriman o se alteren equipos eléctricos o magnéticos situados cerca del compás;
- e) el libro de registro del compás muestre desvíos excesivos, o el compás muestre defectos físicos;
- f) en cualquier otro momento que el Capitán lo considere necesario para la seguridad de la navegación.

Todos los compases magnéticos se compensarán con una frecuencia de:

- cada dos años, como máximo;
- después de dique seco, o
- después de un trabajo estructural importante.

G3. Compensadores del compás

La compensación deberá ser llevada a cabo por un compensador cualificado o por el Capitán del buque.

G4. Compensación mediante la barra Flinders.

Dicha compensación deberá incluir la compensación para todas las latitudes magnéticas en las que el buque pueda operar, por lo que el desvío residual no excederá de 5° si tras la construcción del buque, este realiza un cambio de latitud.

G5. Medios para convertir la indicación de rumbo a un rumbo verdadero

Los medios para convertir la indicación de rumbo a un rumbo verdadero deberán estar disponibles en todo momento.

Por ejemplo, estos medios pueden ser la tablilla de desvíos residuales o la información de la curva, y la variación magnética.

G6. Descripción de la compensación

La compensación se llevará a cabo para los desvíos semicirculares y cuadrantales debidos a:

- a) los componentes horizontales del magnetismo permanente del buque;
- b) el error de escora;
- c) el componente horizontal del magnetismo inducido horizontal;
- d) el componente horizontal del magnetismo inducido vertical,
utilizando respectivamente los dispositivos adecuados.

G7. Curva o tablilla de desvíos

Cada compás magnético se compensará correctamente y su tablilla o curva de desvíos residuales estará disponible a bordo, en todo momento, cerca del puesto de visualización del compás.

A.3. Dispositivos transmisores del rumbo magnético

A.3.1. Introducción

Un dispositivo transmisor del rumbo magnético puede hacer referencia a:

- un dispositivo basado en un sensor magnético acoplado al compás magistral, o
- un compás electromagnético, basado en un sensor magnético que detecta el campo magnético terrestre, y que puede convertir la señal detectada en información de rumbo.

(apartado 3.1 de la Resolución MSC.86(70) de la OMI)

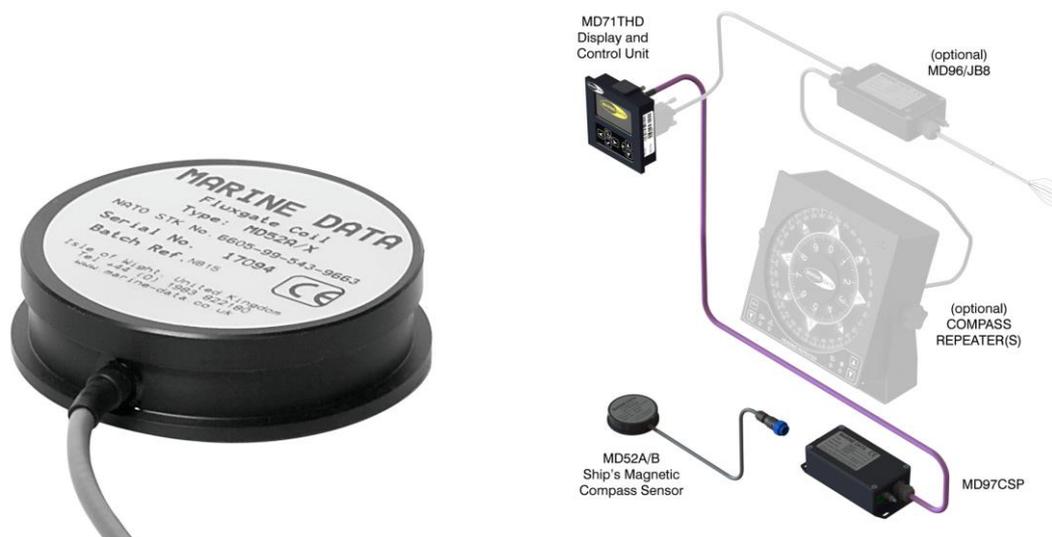


Figura 141. Sensor (fluxgate) para ser acoplado a un compás magnético. Fuente: <https://marine-data.co.uk/product/magnetic-compass-sensor/> (izda.)

Figura 142. Esquema del conjunto de dispositivos que configuran el dispositivo transmisor del rumbo magnético. Fuente: *Ibidem.* (dcha.)



Figura 143. Procesador del sensor del compás. Fuente: *Ibidem.* (izda.)

Figura 144. Dispositivo que permite introducir manualmente la dm y los coeficientes del desvío. Fuente: *Ibidem.* (dcha.)



Figura 145: Compás electromagnético. Fuente: *Ibidem*.

Si el sensor está acoplado al compás magistral, la compensación de dicho compás es válida para el repetidor de rumbo, pues la información del repetidor es la misma que la del compás magistral. No obstante, si se trata de un compás electromagnético, este se debe compensar de manera independiente al compás magistral, y además, siguiendo una técnica diferente, la cual no lleva a cabo un compensador, sino el proveedor.

El apartado V/19.2.3.5 del Convenio SOLAS prescribe un dispositivo transmisor del rumbo (sin especificar que sea magnético o no) para buques de 300 TRB o más, y para todos los buques de pasaje independientemente de su tamaño, a fin de disponer de información de rumbo verdadero en el radar y en el AIS. Además, el apartado V/19.2.5.1 prescribe un compás giroscópico para buques de 500 TRB o más, el cual también debe ser capaz de transmitir la información de rumbo a los equipos citados. Es decir: los buques de 500 TRB o más deben estar equipados con un compás giroscópico y con un dispositivo transmisor del rumbo que tome la señal de él. Por tanto, los buques cuyo arqueado sea igual o superior a 300 TRB, pero inferior a 500 TRB, deben ir provistos de un dispositivo transmisor del rumbo magnético, a menos que lleven un compás giroscópico con dispositivo transmisor de rumbo.

La norma que regula el funcionamiento de los dispositivos transmisores del rumbo es la Resolución MSC.116(73) de la OMI: *Normas de funcionamiento de los dispositivos transmisores del rumbo (DTR) marinos*, aprobada el 7 de diciembre de 2000, la cual reemplaza el Anexo 2 de la Resolución MSC.86(70), aprobada 8 de diciembre de 1998, en virtud de la Resolución MSC.166(78): *Aplicación de las normas de funcionamiento de los dispositivos transmisores del rumbo (DTR) a los dispositivos transmisores del rumbo magnético (DTRM) de uso marítimo*, aprobada el 20 de mayo de 2004. La Resolución MSC.116(73) no hace distinción entre dispositivos indicadores de rumbo, sino que da prescripciones mínimas para todos ellos, sean magnéticos o no. Es por este motivo que reemplaza el Anexo 2 de la Resolución MSC.86(70), el cual hace referencia a los transmisores de rumbo magnético.

Cabe destacar que, tanto la Resolución MSC.116(73), como el Anexo 2 de la Resolución MSC.86(70), prescriben que los dispositivos transmisores del rumbo deben indicar el rumbo verdadero. El apartado 4.4 del Anexo 2 de esta última Resolución, en referencia a los transmisores del rumbo magnético, establece que: *Todos los dispositivos de visualización y todas las salidas de información de rumbo deben indicar el rumbo verdadero. Se debe poder mostrar, o incluir en la salida de información, una indicación de cualquier desvío y variación magnética que se aplique para corregir el rumbo.* Por su parte, la definición dada en el apartado 1.1 de la Resolución MSC.116(73) hace referencia únicamente al rumbo verdadero: *Los dispositivos transmisores del rumbo (DTR) son instrumentos electrónicos que proporcionan información sobre el rumbo verdadero del buque.* Y el párrafo 4.2.1 de esta Resolución dice: *Todos los dispositivos de visualización, excepto el sensor, y todas las señales de rumbo indicarán el rumbo verdadero.*

Asimismo, del contenido de la Resolución MSC.116(73), se desprende que dicha norma está enfocada a compases giroscópicos. En primer lugar, en la mención a la indicación del rumbo verdadero, se obvia la referencia a las correcciones al rumbo magnético, aspecto que la Resolución MSC.86(70) no omite. Y en segundo lugar, en el párrafo 4.3.2, donde se establece la precisión de los distintos tipos de errores, las condiciones en las que se deben observar estos errores están referidas a las resoluciones sobre prescripciones para compases giroscópicos, según estén instalados en naves de gran velocidad o no. En consecuencia, se entiende que los dispositivos transmisores del rumbo (DTR) de un compás magnético, se ajustarán, en todo lo posible, a las especificaciones de los compases giroscópicos. Además, la Resolución MSC.166(78) especifica: *[...] el principio del funcionamiento por magnetismo de los DTR se tiene en cuenta en las dos resoluciones mencionadas supra [MSC.116(73) y MSC.86(70)], lo que ha originado incongruencias e interpretaciones erróneas en la aplicación de las normas de funcionamiento a los DTRM [...].* Por tanto, queda claro que: en primer lugar, el aspecto concreto que se pretende regular es el funcionamiento por magnetismo de los DTR, lo cual se puede hacer aplicando las mismas prescripciones que a cualquier otro DTR; y en segundo lugar, que de no hacerlo así, se producen incongruencias e interpretaciones erróneas en la aplicación de las normas, con lo cual, es más adecuado aplicar una norma única.

Por su parte, la Norma ISO 22090:2014: *Ships and marine technology–Transmitting heading devices (THDs)* detallada de manera más específica las prescripciones relativas a los DTR. En esta norma, sí que se especifica el tipo de DTR en función del tipo de compás, de manera que se estructura en tres partes:

Standard ISO 22090-1:2014: *Ships and marine technology–Transmitting heading devices (THDs)–Part 1: Gyro-compasses*

Standard ISO 22090-2:2014: [...]–Part 2: *Geomagnetic principles*

Standard ISO 22090-3:2014: [...]–Part 3: *GNSS principles*

En el epígrafe A.3.2, se transcribe la Resolución MSC.116(73), que como ya se ha indicado, es la norma única y actual de la OMI. No obstante, en el epígrafe A.3.3, también se transcribe el Anexo 2 de la Resolución MSC.86(70). En primer lugar, porque teóricamente, puede que en algunos casos, todavía esté en vigor (*vide* punto 2 de la Resolución MSC.166(78), la cual está transcrita en el mismo epígrafe), y en segundo lugar, a fin de poder contrastar su contenido con la norma actual.

A.3.2. Resolución MSC.116(73) de la OMI

RESOLUCIÓN MSC.116(73): *NORMAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS TRANSMISORES DEL RUMBO (DTR) MARINOS*. Aprobada el 7 de diciembre de 2000. MSC 73/21/Add.3

EL COMITÉ DE SEGURIDAD MARÍTIMA,

RECORDANDO el Artículo 28 b) de la Convenio constitutivo de la Organización Marítima Internacional, artículo que trata de las funciones del Comité,

RECORDANDO TAMBIÉN la Resolución A.886(21) mediante la cual la Asamblea decidió que el Comité de Seguridad Marítima o el Comité de Protección del Medio Marino, según proceda, se encargaría de adoptar y enmendar las normas de funcionamiento y las especificaciones técnicas en nombre de la Organización,

RECORDANDO ADEMÁS que, de conformidad con lo dispuesto en el Capítulo V revisado del Convenio SOLAS a los buques de arqueo bruto superior a 300 e inferior a 500 que no lleven un girocompás, se les exige llevar un DTR u otro medio de transmitir información sobre el rumbo,

RECORDANDO ASIMISMO que de conformidad con el Código NGV a las naves de pasaje autorizadas a transportar hasta 100 pasajeros que no lleven girocompás se les exige llevar un instrumento adecuado que indique el rumbo,

TOMANDO NOTA de que un DTR debidamente regulado cumplirá con dichas prescripciones,

RECONOCIENDO la necesidad de elaborar las oportunas normas de funcionamiento de los DTR,

HABIENDO EXAMINADO la recomendación sobre las normas de funcionamiento de los DTR formulada por el Subcomité de Seguridad de la Navegación en su 46º periodo de sesiones,

1. APRUEBA la Recomendación sobre las normas de funcionamiento de los dispositivos transmisores del rumbo (DTR) marinos que figura en el Anexo de la presente Resolución;

2. RECOMINEDA a los Gobiernos que garanticen que los DTR instalados el 1 de julio de 2002 o posteriormente, se ajusten a unas normas de funcionamiento que no sean menos rigurosas que las especificadas en el Anexo de la presente Resolución.

ANEXO

RECOMENDACIÓN SOBRE LAS NORMAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS TRANSMISORES DEL RUMBO (DTR) MARINOS

1. *Alcance*

1.1. Los dispositivos transmisores del rumbo (DTR) son instrumentos electrónicos que proporcionan información sobre el rumbo verdadero del buque.

1.2. Además de las prescripciones generales que figuran en la Resolución A.694(17) y de la norma pertinente aplicable al elemento sensor utilizado, el equipo del DTR cumplirá las prescripciones mínimas que se indican a continuación.

1.3. Si en las normas de funcionamiento de la OMI aplicables al elemento sensor no se especifica la zona geográfica de servicio, el DTR funcionará, como mínimo, por lo menos entre 70° de latitud sur y 70° de latitud norte.

2. *Ámbito de aplicación*

2.1. Los DTR que cumplan lo dispuesto en la presente Recomendación podrán utilizarse para obtener la información sobre el rumbo prescrita en el Capítulo V del Convenio SOLAS.

2.2. Además, dichos DTR se ajustarán a las prescripciones relativas al equipo náutico que figuran en el Capítulo 13 del Código NGV según las cuales debe haber a bordo un dispositivo apropiado que proporcione información sobre el rumbo.

3. *Definiciones*

3.1. Rumbo: a los efectos de las presentes normas, el rumbo del buque que se introduzca en el DTR.

3.2. Elemento sensor: función sensora de detección de la información sobre el rumbo, conectada al dispositivo de transmisión.

3.3. Elemento transmisor: dispositivo que recibe la información sobre el rumbo, procedente del elemento sensor, y la convierte en la señal exacta necesaria.

3.4. Rumbo verdadero: Ángulo horizontal formado por el plano vertical que pasa por el meridiano verdadero y el plano vertical que pasa por el eje longitudinal de la nave. Se mide en el sentido de las agujas del reloj desde el norte verdadero (000°) hasta 360°.

3.5. Error de transmisión y de resolución: error debido al procedimiento de transmisión de la información original al dispositivo receptor. La capacidad de codificación de los datos de dicho procedimiento puede ser limitada, por ejemplo una señal en escalón con una resolución de 1/6°.

Este error se debe al procedimiento utilizado para codificar la información dentro del DTR y en la señal de salida.

3.6. Error estático: error causado por un motivo cualquiera, cuyo valor no cambia durante el funcionamiento del sistema. Este error se medirá en condiciones estáticas.

3.7. Error dinámico: error debido a las influencias dinámicas que actúan sobre el sistema, como por ejemplo, las vibraciones, el balance, el cabeceo o la aceleración lineal. Este error puede tener una amplitud y, generalmente, una frecuencia relacionada con las influencias ambientales y los parámetros del sistema.

3.8. Error de discontinuidad: error debido al tiempo que transcurre entre el momento en que existe el valor que se mide y el momento en que se produce la señal, o el flujo de datos correspondiente en la salida del sistema. Por ejemplo, este error es la diferencia entre el rumbo real de la nave mientras gira y la información suministrada a la salida del sistema. El error de discontinuidad desaparece cuando el sistema está estático.

4. *Prescripciones de funcionamiento*

4.1. Funciones

4.1.1. El DTR recibe una señal de rumbo y produce una señal adecuada para otros dispositivos.

4.1.2. El dispositivo puede llevar incorporado cualquier elemento sensor.

4.1.3. Todo dispositivo o parámetro corrector estará protegido de modo que no pueda funcionar por inadvertencia.

4.2. Presentación de la información

4.2.1. Todos los dispositivos de visualización, excepto el sensor, y todas las señales de rumbo indicarán el rumbo verdadero. [Esta prescripción también figura en la Resolución MSC.86(70)]

4.2.2. Existirán medios adecuados para introducir manualmente los valores destinados a corregir los datos electrónicos.

4.3. Precisión

4.3.1. El DTR se someterá a prueba para determinar su precisión, con el elemento sensor conectado. Si el elemento sensor está integrado en el elemento transmisor, el equipo se someterá a prueba con todas sus partes.

4.3.2. El DTR tendrá en su señal de salida, como mínimo, la siguiente precisión en los estados de la mar que se estipulan en la Resolución A.424(XI) o A.821(19), según corresponda:

1. errores de transmisión y de resolución. El error de transmisión, incluido el de resolución, será inferior a $\pm 0,2^\circ$;

2. errores estáticos. El error estático será inferior a $\pm 1,0^\circ$;

3. errores dinámicos*. La amplitud del error dinámico será inferior a $\pm 1,5^\circ$ y su frecuencia será inferior a 0,033 Hz, equivalente a un periodo no inferior a 30 s si la amplitud del error dinámico es superior a $\pm 0,5^\circ$; y

4. errores de discontinuidad. El error de discontinuidad para diferentes velocidades de giro será:

4.1. inferior a $\pm 0,5^\circ$ a velocidades de hasta 10°/s; y

4.2. inferior a $\pm 1,5^\circ$ a velocidades comprendidas entre 10°/s y 20°/s.

4.4. Interfaz

Como mínimo, una salida de información se ajustará a las normas internacionales pertinentes sobre interfaces marinas**.

5. *Compatibilidad electromagnética*

Por lo que respecta a la interferencia e inmunidad electromagnética, el dispositivo cumplirá lo dispuesto en la Resolución A.694(17)*** y en la Resolución A.813(19)****.

6. *Fallos*

Se proveerá una señal de alarma que indique el funcionamiento defectuoso del DTR o los fallos del suministro de energía.

* Si el elemento sensor es magnético, se ajustará a lo dispuesto en la Resolución A.382(X) y se someterá a prueba por separado de conformidad con las normas pertinentes.

** *Vide* Publicación 61162 de la Comisión Eléctrotécnica Internacional (CEI) / *International Electrotechnical Commission (IEC)*

*** *Vide* Publicación 60945 de la CEI.

**** *Vide* Publicación 60533 de la CEI.

A.3.3. Resolución MSC.166(78) y Anexo 2 de la Resolución MSC.86(70) de la OMI

RESOLUCIÓN MSC.166(78): *APLICACIÓN DE LAS NORMAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS TRANSMISORES DEL RUMBO (DTR) A LOS DISPOSITIVOS TRANSMISORES DEL RUMBO MAGNÉTICO (DTRM) DE USO MARÍTIMO*. Aprobada el 20 de mayo de 2004. MSC 78/26/Add.2

EL COMITÉ DE SEGURIDAD MARÍTIMA,

RECORDANDO el Artículo 28 b) de la Convenio constitutivo de la Organización Marítima Internacional, artículo que trata de las funciones del Comité,

RECORDANDO TAMBIÉN la Resolución A.886(21) mediante la cual la Asamblea decidió que el Comité de Seguridad Marítima y/o el Comité de Protección del Medio Marino, según proceda, se encargarían de aprobar y enmendar las normas de funcionamiento y las especificaciones técnicas en nombre de la Organización,

RECORDANDO ADEMÁS que, de conformidad con lo dispuesto en el Capítulo V del Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar (SOLAS), 1974, enmendado, a los buques de arqueo bruto superior a 300 e inferior a 500 que no lleven un girocompás, se les exige llevar un dispositivo transmisor del rumbo (DTR) u otro medio para transmitir el rumbo,

RECORDANDO ASIMISMO que, en el 70º y en el 73º periodos de sesiones, había adoptado, respectivamente, la Resolución MSC.86(70): *Aprobación de normas de funcionamiento nuevas y enmendadas para el equipo náutico*, en cuyo Anexo 2 figuran las *Normas de funcionamiento de los dispositivos transmisores del rumbo magnético (DTRM) de uso marítimo*, y la Resolución MSC.116(73): *Normas de funcionamiento de los dispositivos transmisores del rumbo (DTR) marinos*;

RECONOCIENDO que el principio del funcionamiento por magnetismo de los DTR se tiene en cuenta en las dos resoluciones mencionadas supra, lo que ha originado incongruencias e interpretaciones erróneas en la aplicación de las normas de funcionamiento a los DTRM;

1. RECOMIENDA a los Gobiernos miembros que se aseguren de que los DTRM instalados el 1 de enero de 2002 o posteriormente cumplen normas de funcionamiento que no sean inferiores a las estipuladas en la Resolución MSC.116(73);
2. RECOMIENDA ASIMISMO a los Gobiernos miembros que continúen aceptando los equipos instalados antes del 1 de julio de 2002 que cumplan lo dispuesto en el Anexo 2 de la Resolución MSC.86(70);
3. DECIDE que, para aplicaciones futuras, se suplante el Anexo 2 de la Resolución MSC.86(70) por lo dispuesto en la Resolución MSC.116(73).

RESOLUCIÓN MSC.86(70): *APROBACIÓN DE NORMAS DE FUNCIONAMIENTO NUEVAS Y ENMENDADAS PARA EL EQUIPO NÁUTICO*. Aprobada el 8 de diciembre de 1998. MSC 70/23/Add.2

ANEXO 2

RECOMENDACIÓN SOBRE NORMAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS TRANSMISORES DEL RUMBO MAGNÉTICO (DTRM) DE USO MARÍTIMO

1. Alcance

1.1. Un DTRM es un dispositivo electrónico que usa el campo geomagnético para obtener y transmitir información sobre el rumbo del barco.

1.2. Además de los requisitos generales contenidos en la Resolución A.694(17), todos los DTRM marinos deben cumplir con los siguientes requisitos mínimos.

2. Aplicación

2.1. Un DTRM que cumpla con los requisitos contenidos en esta Recomendación, se puede usar para cumplir los requisitos referentes a estar equipado con un dispositivo adecuado que proporcione la información del rumbo contenida en el Capítulo V del Convenio SOLAS.

2.2. Además, dicho DTRM puede cumplir los requisitos dinámicos contenidos en el Capítulo 13 del Código NGV, referente a estar equipado con un dispositivo adecuado que proporcione la información del rumbo.

3. Composición

3.1. Los dispositivos transmisores del rumbo magnético (DTRM) pueden consistir en:

3.1.1. un compás magnético magistral equipado con un sensor magnético y elementos electrónicos para generar una señal de salida de información adecuada para otros dispositivos.

El compás utilizado debe ser el compás magnético magistral prescrito en el Capítulo V del Convenio SOLAS; o

3.1.2. un compás electromagnético que consta del sensor y de elementos electrónicos para generar una señal de salida de información adecuada para otros dispositivos; o

3.1.3. cualquier tipo de los definidos en 1 y 2, que adicionalmente esté equipado con un giróscopo para mejorar el rendimiento dinámico.

4. Construcción

4.1. Línea de fe

4.1.1. Se debe marcar la línea de fe en la carcasa del sensor magnético, el cual se debe instalar paralelo a la línea de crujía.

4.1.2. La precisión de la línea de fe debe estar dentro de $\pm 0,5^\circ$ de la dirección proa-popa de la carcasa.

4.1.3. Si se lleva instalado un giróscopo, se debe marcar de la misma manera, y adicionalmente, se debe indicar la parte superior o la inferior.

4.2. Montaje

4.2.1. En los arreglos del montaje del sensor magnético, se deben tomar medidas para la corrección de cualquier desalineación de hasta $\pm 5^\circ$ con respecto a la línea de crujía.

4.2.2. La instalación del acoplamiento del sensor al compás prescrito en el párrafo 3.1 de arriba, debe permitir que el compás siga cumpliendo con la Resolución A.382 (X), con particular referencia a la precisión, funcionamiento de la suspensión cardán y uso del dispositivo de lectura azimutal.

4.3. Compensación del desvío y del error de escora

4.3.1. Se deben tomar medidas para compensar el desvío y el error de escora, y debe ser posible compensar los siguientes valores:

1. componente vertical del campo magnético del buque (que produce el error de escora): hasta $\pm 75 \mu\text{T}$;
2. coeficiente A: hasta $\pm 3^\circ$;
3. coeficiente B: hasta $\pm (720/H)^\circ$; [o sea: para $H = 18 \mu\text{T}$, se deben poder corregir 40°]
4. coeficiente C: hasta $\pm (720/H)^\circ$; [idem]
5. coeficiente D: hasta $\pm 7^\circ$; y
6. coeficiente E: hasta $\pm 3^\circ$,

donde H es el componente horizontal de la densidad de flujo geomagnético en microteslas (μT).

4.3.2. Indicación de la corrección del rumbo

Los valores utilizados para la corrección electrónica del rumbo deben estar indicados por medios adecuados, y se deben almacenar de manera que estos valores se recuperen automáticamente al conectar el dispositivo.

4.3.3. Protección de la compensación

Los dispositivos compensadores deben estar protegidos contra una operación inadvertida.

4.4. Salida de información de rumbo

Todos los dispositivos de visualización y todas las salidas de información de rumbo deben indicar el rumbo verdadero. Se debe poder mostrar, o incluir en la salida de información, una indicación de cualquier desvío y variación magnética que se aplique para corregir el rumbo.

4.5. Interfaces

El DTRM debe estar diseñado para transmitir información de rumbo a otros equipos. Como mínimo, una salida de información se ajustará a la norma internacional pertinente sobre interfaces marinas.

5. Rendimiento

Se requiere que se observen las siguientes normas de rendimiento, bajo las condiciones de un valor de 18 μT del componente horizontal del campo geomagnético y de las condiciones ambientales experimentadas a bordo de los buques.

5.1. Precisión del rumbo

5.1.1. Estático

La precisión estática de la indicación del rumbo debe estar dentro de $\pm 1,0^\circ$.

5.1.2. Dinámico

La precisión dinámica de la indicación del rumbo debe estar dentro de $\pm 1,5^\circ$ sobre la precisión estática que se ha definido. Los periodos de oscilación del error no deben ser inferiores a 30 s bajo las condiciones de los diversos estados de la mar y del movimiento que se pueda experimentar a bordo de los buques.

5.2. Precisión de seguimiento del sistema de transmisión

La precisión de seguimiento del sistema de transmisión debe estar dentro de $\pm 1,5^\circ$, cuando el sensor esté girado a una velocidad de $20^\circ/\text{s}$.

6. Compatibilidad electromagnética

Por lo que respecta a la interferencia e inmunidad electromagnética, el dispositivo cumplirá lo dispuesto en la Resolución A.694(17) y en la Resolución A.813(19).

7. Fallos

Se proveerá una señal de alarma que indique los fallos del suministro de energía.