

## 13- ANEXOS

### 13.1 – INTRODUCCIÓN A LA MAGNETOHIDRODINÁMICA

#### 13.1.1 - Principio de funcionamiento de los motores magnetohidrodinámicos MHD

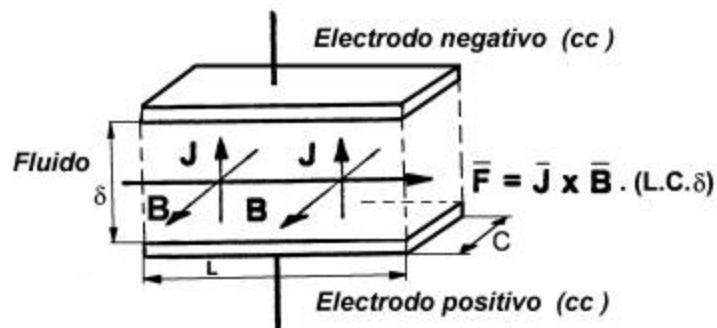
Cuando un conductor transporta una corriente en el interior de una región donde hay un campo magnético, éste efectúa sobre el conductor una fuerza que es igual a la suma de las fuerzas magnéticas sobre las partículas cargadas que producen la corriente. ¿?.

Podemos escribir la fuerza como:

$$d\vec{F} = \vec{I} \cdot d\vec{l} \times \vec{B} \quad (13.1.1.a)$$

Si construimos un dispositivo en el cual el conductor por el que circula la corriente es un fluido, por ejemplo, agua de mar (“hidro”), se produce el movimiento (“dinámico”) del agua de mar debido a la interacción del campo magnético (“magneto”) y a la corriente que circula por el agua. A este dispositivo le llamamos motor magnetohidrodinámico.

Los motores magnetohidrodinámicos clásicos trabajan con campos eléctricos y magnéticos constantes con el tiempo (corriente continua) como se puede ver en la figura nº86



$\delta$  = distancia entre electrodos

$L$  = longitud electrodos

$C$  = ancho electrodos

Fig. 86: Principio de funcionamiento de los motores magnetohidrodinámicos.

La MHD provoca fenómenos electrolíticos en los electrodos que reducen drásticamente el rendimiento electromecánico, además de presentar dificultades tecnológicas al disolverse los electrodos y desprenderse gases procedentes de la electrólisis de los materiales afectados.

El potencial de electrodo supone un valor fijo y no despreciable que reduce mucho el rendimiento eléctrico del rotor. Introducir corrientes circulares en el seno del agua es uno de los objetivos, pues evitaría la caída de tensión en los electrodos. Con ello se aumenta drásticamente el rendimiento eléctrico del rotor. También se ahorran los problemas tecnológicos planteados por los electrodos. Establecer corrientes circulares en el seno del agua es una opción teóricamente posible, pero de la que no se encuentra literatura ni hay antecedentes de realizaciones prácticas.

Hay que definir el comportamiento eléctrico del agua salada atravesada por corrientes circulares, cerradas sobre sí mismas. También los estatores capaces de crear los campos magnéticos necesarios, así como analizar el comportamiento del agua en función de densidad de corriente, campo magnético, frecuencia, forma, deslizamiento, etc.

### 13.1.2 - Definición y presentación

La **Magnetohidrodinámica** (M.H.D) cubre todos los dominios donde un fluido conductor de la electricidad, el campo magnético  $\vec{B}$  y el campo de la velocidad están acoplados. Este acoplamiento es debido a la interacción entre dos disciplinas que son el electromagnetismo y la hidrodinámica.

Los fluidos afectados son numerosos. Se puede citar por ejemplo los electrolitos, los plasmas (gas de partículas ionizadas) y los metales líquidos. Los parámetros físicos (intensidad de las inducciones magnéticas y de los campos eléctricos, velocidad de circulación del fluido, presión, masa volumétrica, etc.) que intervienen dentro de estas técnicas pueden variar en varios órdenes de magnitud según las aplicaciones [15].

### 13.1.3 - Fluidos transportables por la M.H.D.

Sólo es posible impulsar fluidos que presenten un carácter más o menos conductor, es decir, que puedan ser accionados directamente por campos magnéticos: metales fundidos, ferrofluidos, soluciones conductoras, plasma y otros fluidos.

Material	$\sigma$ ( $\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ )
Agua destilada	$\approx 10^{-4}$
Electrolitos débiles	$10^{-4}$ a $10^{-2}$
Electrolitos fuertes	$10^{-2}$ a $10^2$
agua + 25% Na Cl (20°C)	21,6
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> puro (20°C)	73,6
Vidrio fundido (1400°C)	$10$ a $10^2$
Plasmas "Fríos" (T $\approx 10^4$ K)	$\approx 10^3$
Plasmas "Calientes" (T $\approx 10^6$ K)	$\approx 10^6$
Gas totalmente ionizado	$\approx 10^7 T^{3/2}$
Metales líquidos	$10^6$ a $10^7$
Acero (1500°C)	$0,7 \cdot 10^6$
Mercurio(20°C)	$10^6$
Aluminio(700°C)	$5 \cdot 10^6$
Sodio(400°C)	$6 \cdot 10^6$
Metales sólidos	$10^6$ a $10^8$
Acero(20°C)	$\approx 10^6$
Sodio(20°C)	$\approx 10^7$
Cobre(20°C)	$6 \cdot 10^7$

Tabla 17: Conductividades eléctricas típicas

La tabla 17 presenta las conductividades eléctricas de los fluidos más típicos, y de algunos metales sólidos, como, por ejemplo, el cobre.

La observación detenida de esta tabla da idea de las posibilidades tecnológicas de los diferentes plasmas debido a su alta conductividad.

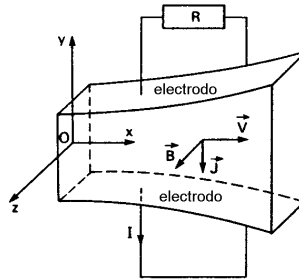


Fig.87: Generador MHD

Si hacemos circular un fluido conductor dentro de un campo magnético se generan unas corrientes eléctricas que son recogidas entre dos electrodos. La ventaja evidente del generador MHD es que no tiene ninguna pieza móvil (Fig. 87).

La fig.87 puede representar un sistema de conversión directa de energía térmica en eléctrica, existen algunas realizaciones prácticas de tecnología muy compleja. Lo ideal, sería evitar los electrodos con un acoplamiento electromagnético, tecnológicamente hablando.

### 13.1.4 - Ecuaciones generales

Las ecuaciones generales que a continuación se presentan conciernen a la descripción matemática de fluidos no magnéticos conductores de la electricidad (por ejemplo, metal líquido, agua de mar, etc.)

Estas ecuaciones generales son dentro del caso de un fluido incompresible:

#### - Las ecuaciones de Maxwell

$$\text{Rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (13.1.4.a)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (13.1.4.b)$$

$$\text{Rot } \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (13.1.4.c)$$

$$\text{div } \vec{J} = 0 \quad (13.1.4.d)$$

#### - La ley de Ohm

$$\bar{J} + \text{grad} \bar{V} + \bar{B} \quad (13.1.4.e)$$

- La ecuación de conservación de la masa que se reduce a:

$$\text{div} \bar{V} = 0 \quad (13.1.4.f)$$

- La ecuación de Navier-Stokes

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \text{grad} \bar{V} + \frac{1}{\rho} \text{grad} P + \bar{J} + \bar{B} = \nu \nabla^2 \bar{V} \quad (13.1.4.g)$$

donde :

$\rho$  = masa volumétrica del fluido

$\nu = \eta / \rho$  = viscosidad cinemática del fluido, suponiendo las dos constantes

$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t}$  = aceleración de la partícula fluida

$\text{grad} \bar{V}$  = término no lineal. Corresponde a la aceleración asociada a la variación espacial de la velocidad que adquiere una partícula fluida en el curso de su movimiento. Este término también está presente dentro de un campo de velocidad estacionario.

$\bar{J} + \bar{B}$  = es la fuerza electromagnética por unidad de volumen aplicado a un fluido. Este término tiene un mayor peso en la M.H.D. y es uno de los responsables de la puesta en movimiento del fluido. Traduce la influencia de  $\bar{B}$  en  $\bar{V}$ .

$\frac{1}{\rho} \text{grad} P$  = representa la fuerza de presión por unidad de volumen. Existe incluso en ausencia del movimiento del fluido. Para un fluido inmóvil ( $\bar{V} = 0$ ), la relación (13.1.4.g) se reduce a:

$$\bar{J} + \bar{B} = \text{grad} P \quad (13.1.4.h)$$

es decir que  $\bar{J} + \bar{B}$  es un gradiente de presión motriz;

$\nu \nabla^2 \bar{V}$  representa las fuerzas de fricción viscosas asociadas a las restricciones tangenciales debido al deslizamiento relativo de las diferentes capas del fluido.

### 13.1.5 - Aplicaciones

La M.H.D. ofrece un potencial de aplicaciones industriales y de investigación considerables, aunque con barreras tecnológicas todavía muy importantes.

Dentro del dominio de la energía la M.H.D. ofrece muchas posibilidades de aplicaciones “clásicas”; por ejemplo, en metalurgia, en generación de electricidad y en bombas o impulsores electromagnéticos.

#### **Metalurgia**

Los metales líquidos tienen una ventaja considerable debido a una conductividad eléctrica ( $\sigma \approx 10^6$  S/m) del orden de  $10^5$  más grande que los otros líquidos (por ejemplo agua de mar  $\sigma < 10$  S/m). La facilidad de generación de la fuerza electromagnética suficiente, proporcional a  $\sigma$ , se evidencia en los hornos de inducción capaces de calentar un metal fundido, agitarlo violentamente, a la vez que se le mantiene en suspensión, fenómeno de la levitación.

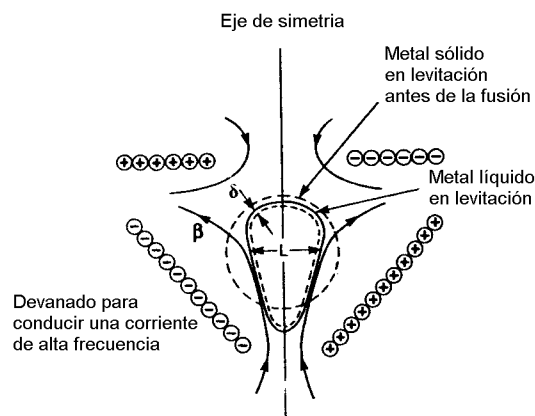


Fig. 88: Dispositivo de levitación.

La levitación magnética (fig.88) y la MHD interna en este caso, introducen tres mejoras en este campo:

La ausencia de contacto entre la carga (metal a fundir) y el crisol evita la contaminación del metal por las paredes (C,S).

El calentamiento de la carga por efecto Joule provoca la fusión del metal.

El movimiento interno del fluido produce una mezcla más eficaz.

#### **Generación de electricidad**

La generación de electricidad es una de las aplicaciones de la MHD. Trata de la conversión de la energía mecánica del movimiento de un fluido. En energía eléctrica este fluido circula a gran velocidad por la expansión de un gas caliente ( $T_g \approx 2000^\circ\text{C}$ ) en presencia de un campo magnético intenso (4 a 5 T). Este mecanismo (Fig.89)

permite transformar directamente el calor en electricidad sin pasar por la turbina como en las centrales clásicas o formando ciclos combinados. Se han realizado estudios donde se utilizan bobinados superconductores.

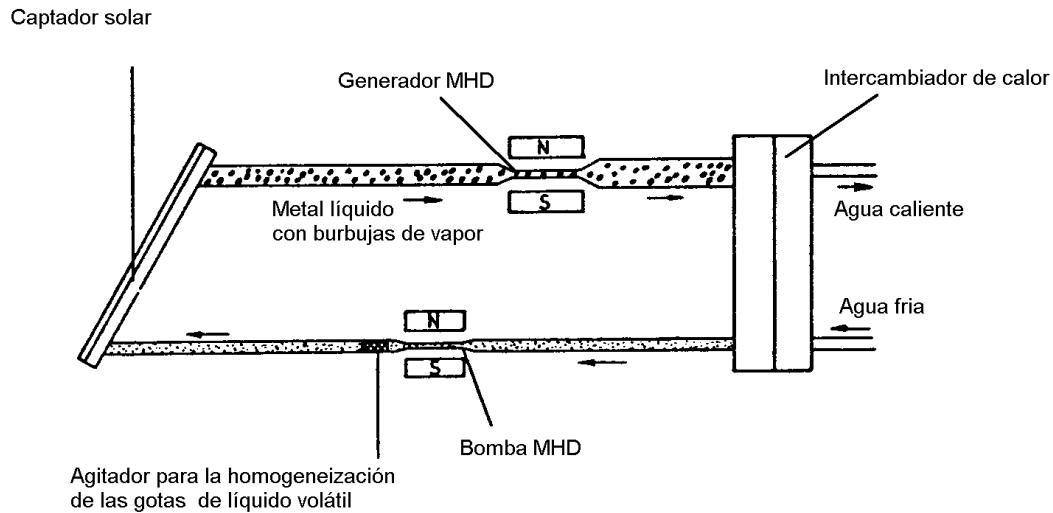


Fig. 89: Generador MHD con metal líquido y paneles solares

### ***Impulsores electromagnéticos***

La conversión M.H.D. puede igualmente efectuarse en sentido inverso; es posible utilizar la energía eléctrica para poner un fluido en movimiento. Un mecanismo así se le podría llamar Impulsor electromagnético. Estos impulsores (de inducción, por ejemplo) tienen la ventaja respecto a las bombas mecánicas de no tener ninguna pieza móvil y tampoco ningún contacto con el fluido porque este último es impulsado por las fuerzas electromagnéticas.

La propulsión M.H.D., como las bombas electromagnéticas, es un aspecto de la conversión M.H.D. de la electricidad en energía mecánica. En los últimos años ha adquirido mucho interés, gracias a los resultados obtenidos por los superconductores NbTi y Nb<sub>3</sub>Sn que transportan una corriente de varios kiloamperios dentro de campos magnéticos del orden de 10T.

#### **13.1.5.1 - Propulsión MHD naval**

La idea de utilizar las técnicas M.H.D. para impulsar el agua del mar se hace posible gracias al valor no nulo de la conductividad eléctrica del agua del mar. De igual manera que las bombas o impulsores de sodio líquido, es posible realizar las bombas o impulsores de agua de mar que impulsan por detrás la masa de agua

aspirada por delante, creando de esta manera, por reacción, un efecto de propulsión. Los primeros estudios datan de los años 60 y tratan de la propulsión de los buques de superficie o de los submarinos. El desarrollo de la propulsión M.H.D. se vio frenada por la necesidad de tener inducciones magnéticas importantes ( $>5 \text{ T}$ ) dentro de grandes volúmenes (centenares de  $\text{m}^3$ ) para obtener un rendimiento interesante. Actualmente hay varios estudios en marcha debido al progreso de la superconductividad en el mundo.

### 13.1.5.2 - Propulsión por conducción (M.H.D.)

La propulsión M.H.D. está basada en la interacción entre el campo magnético producido por los inductores alimentados en corriente continua y el campo eléctrico generado por una diferencia de potencial entre dos electrodos dentro del agua de mar.

El ajuste de la potencia propulsora se obtiene variando la inducción magnética o la corriente del electrodo. La mejor solución es la modulación de la corriente del electrodo para favorecer un funcionamiento del inductor superconductor en modo continuo (fig.90).

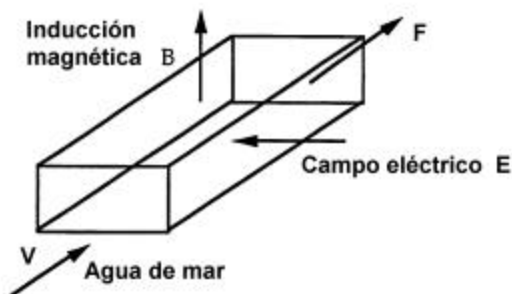


Fig. 90: Esquema del principio de M.H.D.

### 13.1.5.3 - Configuración de propulsores M.H.D.

El objetivo de desarrollar fuerzas electromagnéticas propulsoras, se consigue mediante varias configuraciones geométricas:

- toroidal
- solenoidal
- dipolar
- “jaula de ardilla”



Las configuraciones deberán tener una buena homogeneidad del campo dentro de las partes activas del propulsor

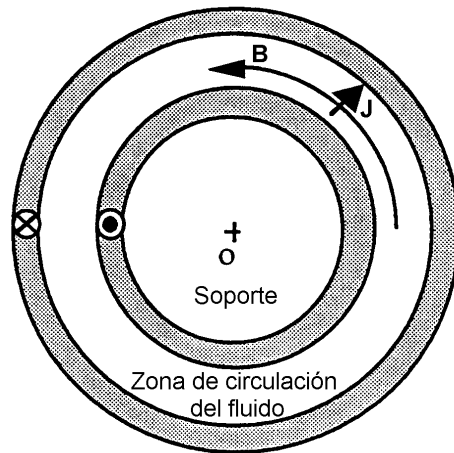


Fig. 91 : Corte de un propulsor con una configuración toroidal

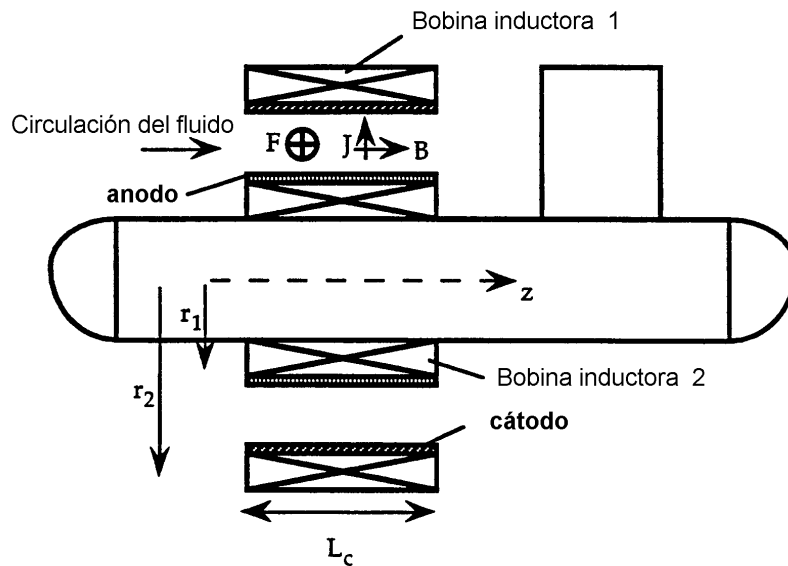


Fig.92: Corte longitudinal de un propulsor con una configuración de doble solenoide

La configuración de la fig.92, nos da una fuerza tangencial al solenoide interno, que se convierte en una fuerza axial, mediante unas paletas helicoidales dispuestas dentro del canal o espacio entre los dos solenoides.

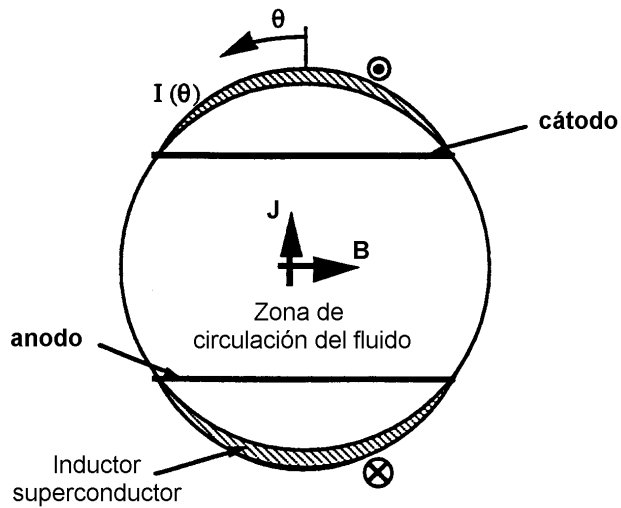


Fig. 93: Corte de un propulsor con una configuración dipolar

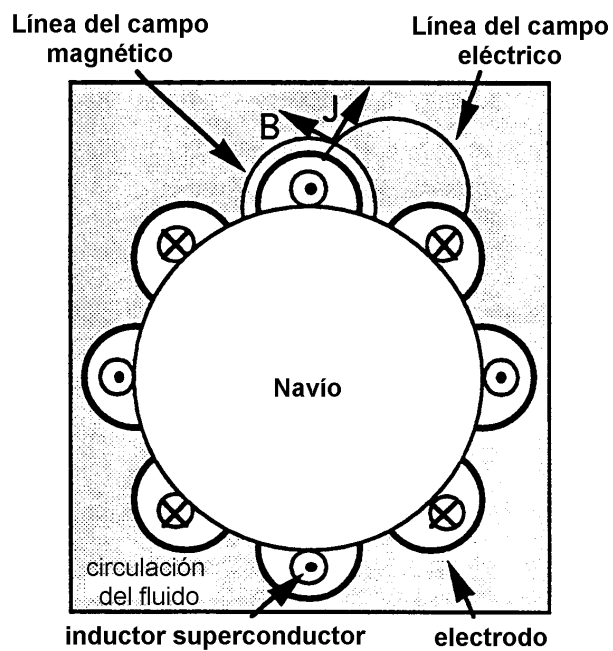


Fig. 94: Corte de un propulsor con una configuración "jaula de ardilla"

### 13.1.5.4 - Prototipo de buque con propulsores M.H.D. YAMATO 1

El 27 de enero de 1992, "Mitsubishi Heavy Industry" probó en Kobe (Japón) un buque con propulsores MHD, llamado YAMATO 1 (fig.95).

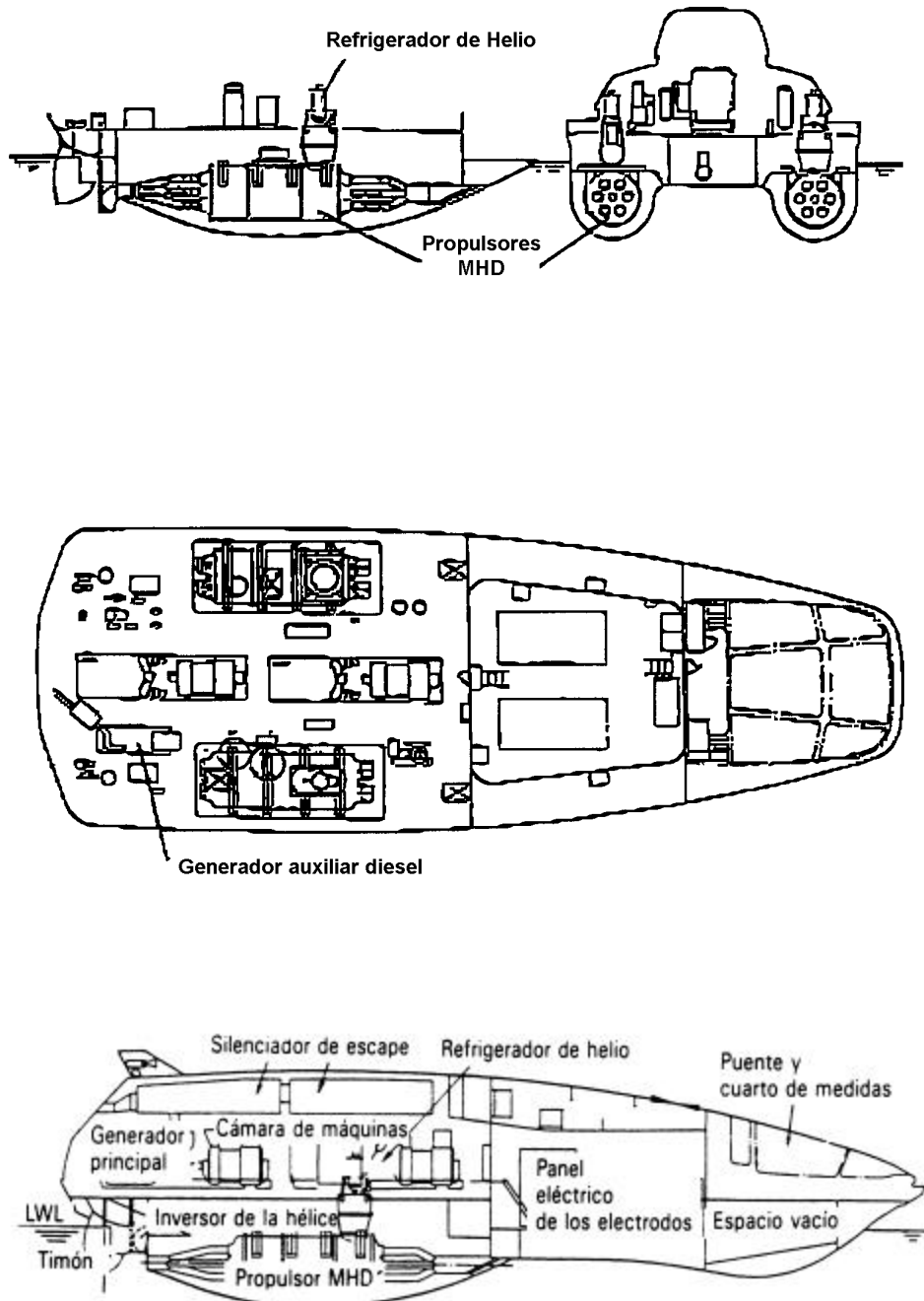


Fig.95:Vista general del Yamato-1

El YAMATO 1 consigue la fuerza de impulsión con 12 unidades de motores como el de la fig.96, asociados con la forma de la fig.97.

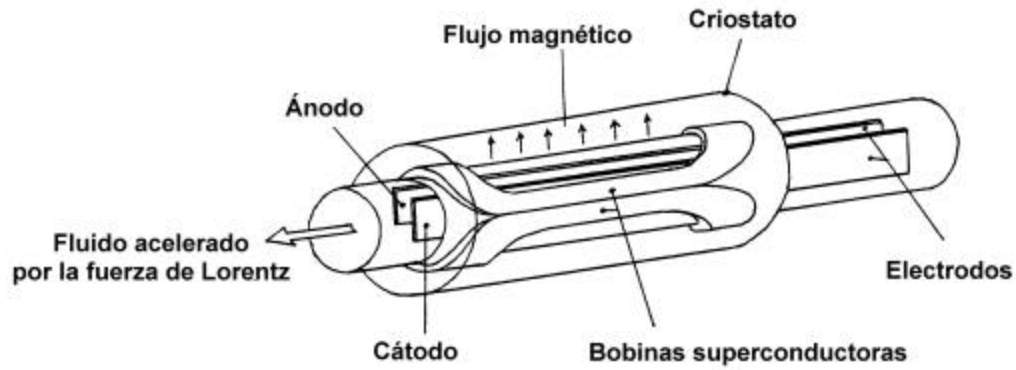


Fig.96 : Esquema básico de un motor magnetohidrodinámico del Yamato-1.

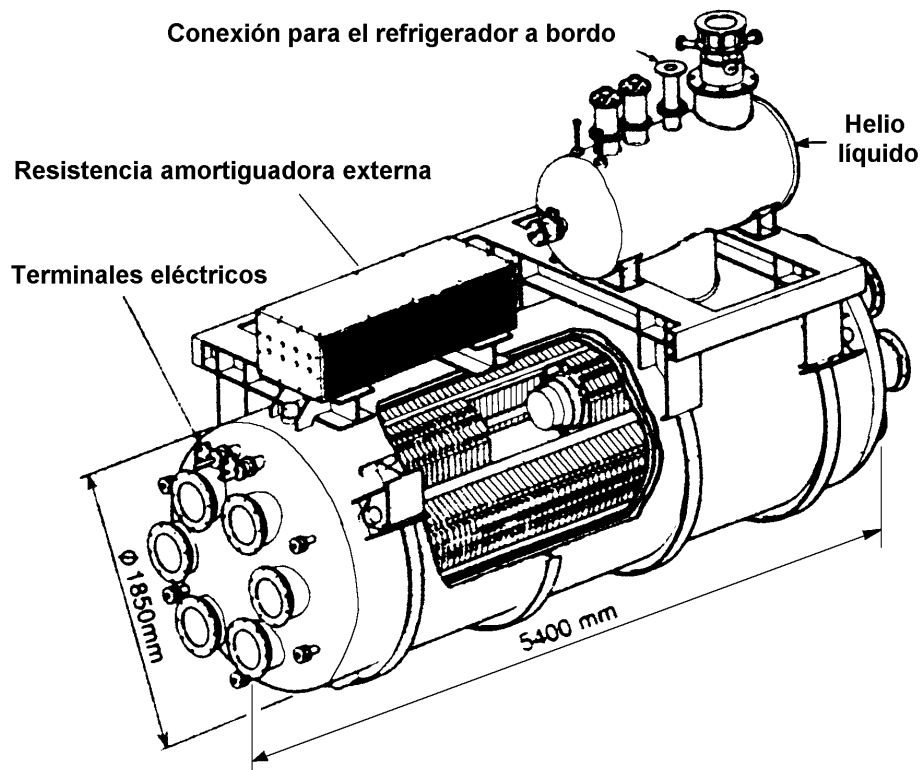


Fig.97: Dibujo de perspectiva de un grupo propulsor M.H.D. del Yamato-1

Características de cada uno de los motores MHD del YAMATO 1 ¿11?

Densidad de flujo magnético:	4T
Conductividad del agua de mar:	4S/m
Tensión entre electrodos:	135 V
Distancia entre electrodos:	0,175 m
Densidad de corriente entre la cara de los electrodos:	4525 A/m <sup>2</sup>
Potencia eléctrica absorbida:	270 kW
Fuerza de Lorentz:	1300 N

Características del YAMATO 1 ¿11?

Fuerza de Lorentz:	15600 N
Velocidad estimada del buque:	5,39 m/s
Desplazamiento:	185 toneladas
Potencia eléctrica absorbida:	3240 kW

### 13.1.5.5 - Ventajas e inconvenientes

La propulsión M.H.D. presenta un potencial número de ventajas.

#### ***Rendimiento***

La M.H.D. es susceptible de funcionar con unos rendimientos elevados (>50%). Esto depende de las condiciones de funcionamiento (velocidad del buque y inducción magnética) y de las condiciones criogénicas.

#### ***Detectabilidad acústica***

Suprimiendo la hélice, la línea del árbol y el reductor, se disminuyen las emisiones acústicas debidas a la excitación de los modos de resonancia del casco por la hélice a través de la línea del árbol, cavitación, variación de presión por la hélice....

#### ***Estanqueidad***

Se elimina la necesidad de realizar juntas estancas giratorias, sometidas a presiones elevadas, al suprimir el paso del árbol (las alimentaciones eléctricas y criogénicas de propulsión atraviesan el casco con juntas fijas).

#### ***Arquitectura naval***

El emplazamiento de la central de energía puede ser optimizado sin las condiciones que impone la línea del árbol.

### ***Maniobrabilidad***

La marcha hacia adelante o hacia atrás se puede obtener cambiando la dirección del campo eléctrico o la inducción magnética. Además, la forma modular del sistema propulsor permite un funcionamiento en régimen gradual. Se puede considerar la supresión del timón controlando la alimentación de los inductores repartidos por la periferia del casco del buque y mejorar así las formas hidrodinámicas de los buques.

A pesar de estas ventajas, la aplicación militar de un sistema tan caro, está en entredicho pues nuevas señales pueden poner en evidencia la discreción del propulsor:

- Existe una señal magnética residual debido a las fugas de campo de inducción magnética del propulsor. Actualmente es posible detectar campos magnéticos de  $10^{-9}$  T a  $10^{-10}$  T a decenas de metros de los buques.
- La señal química proveniente de la descomposición del agua del mar (electrólisis). En efecto, cuando una corriente eléctrica continua circula entre dos electrodos, se genera un fenómeno de electrólisis con desprendimiento de gas: formación de burbujas de oxígeno o de cloro según la intensidad de la corriente frente al ánodo y formación de burbujas de hidrógeno frente al cátodo.
- La señal óptica debida a la dispersión y a la disolución de las microburbujas formadas por la descomposición química del agua del mar.
- La señal eléctrica causada por los campos eléctricos (desde centenares de Volts por metro) y creada en los electrodos del propulsor.
- La señal térmica: originada por las pérdidas por efecto Joule disipadas dentro del canal que calientan el agua. Un calentamiento del orden de  $10^{-2}$  K parece admisible.

### **13.1.6 - Principio de funcionamiento de los motores de inducción magnetohidrodinámica IMHD**

El principio de funcionamiento de los IMHD se basa en la corriente alterna inducida en el secundario o rotor al igual que en las jaulas de ardilla. Así se evita el contacto eléctrico físico del rotor con su fuente de energía.

De manera parecida a la clasificación que se hace con los motores rotativos en motores de corriente continua y en motores de corriente alterna de inducción, se podría clasificar a los motores magnetohidrodinámicos MHD, como motores de corriente continua y a los de inducción magnetohidrodinámica, IMHD como motores de corriente alterna o de inducción.

Según la ley de Lenz, la dirección de las corrientes de Eddy (corrientes del secundario) se tiene que oponer al cambio que las produce. Por esta razón, las corrientes de Eddy tienen que producir polos magnéticos efectivos en el secundario que son atraídos por los polos creados por el inductor del motor lineal, lo que ocasiona una fuerza de arrastre sobre el fluido.

### **13.1.7 - Propulsión por inducción (IMHD)**

Este es el sistema que se propone.

Los devanados inductores alimentados por las corrientes alternas polifásicas generan una inducción magnética senoidal deslizante (fig.98). El inducido puede ser el agua del mar, por donde las corrientes se cierran e interaccionan con el campo inductor y desarrollan una fuerza que “bombea” el agua hacia atrás. Como resultado se obtiene una fuerza propulsora aplicada al buque. La transferencia de energía entre el devanado y el desplazamiento del fluido se hace por acoplamiento magnético. El desplazamiento del fluido puede ser interno (en canal) o externo.

El motor lineal de inducción que impulsa un fluido (IMHD) es complicado porque la velocidad no es constante, y hay unas pérdidas adicionales debidas a la viscosidad del fluido u otros factores todavía desconocidos. A pesar de las dificultades tecnológicas de implementación, las ventajas de aplicación justifican con creces los esfuerzos realizados para desarrollar esta tecnología. La geometría de los motores IMHD es similar a los motores de inducción lineal con inducido sólido y tiene las mismas distorsiones de los campos electromagnéticos (efecto de longitud finita, efecto de anchura finita y efectos de penetración).

La ventaja principal del sistema IMHD es que no necesita electrodos como el MHD, y este hecho evita problemas de corrosión y de electrólisis que afectan a los MHD.

También es de esperar una caída de tensión menor al no existir potenciales de electrodo de ánodo y cátodo.

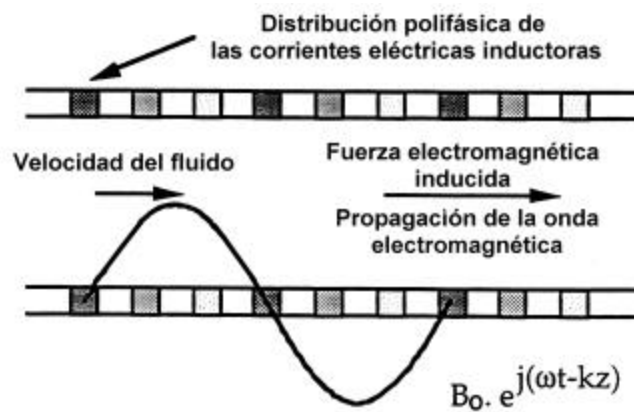


Fig.98:Esquema de principio de la IMHD

### ***Modelado de un motor de inducción magnetohidrodinámica (IMHD).***

Para precisar el funcionamiento de un motor IMHD, fijaremos una geometría simple. Nos limitaremos a un modelo 2D.

### ***Estudio preliminar de las dimensiones.***

Se considera una repartición de corriente en capas infinitamente pequeñas, con una densidad senoidal lineal de corriente (Fig.99):

$$J_x = J_0 \cos\left(\frac{2\pi y}{\lambda}\right) \quad (13.1.7.a)$$

Dentro del plano xoy,  $\lambda$  es la longitud de onda o el doble paso polar.



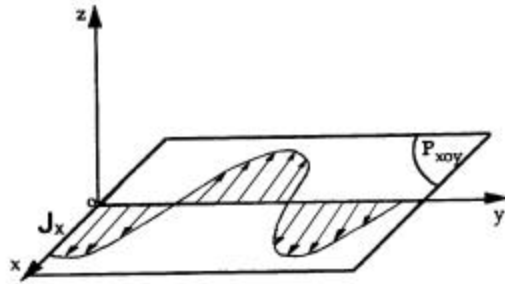


Fig.99: Densidad de corriente lineal senoidal.

Se supone un medio conductor (agua de mar) lineal, homogéneo, isótropo, no magnético, caracterizado por la relación:

$$\bar{J} = ? \bar{E}$$

Los valores del campo magnético  $\bar{B}$  y eléctrico  $\bar{E}$  en el interior de dicho fluido verifican las relaciones:

$$\overline{Rot} \bar{B} = ? \bar{J}$$

$$div \bar{B} = 0$$

$$\overline{Rot} \bar{E} = ? \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$$

Para obtener la ecuación general que satisfaga  $\bar{B}$  se utiliza la relación de análisis vectorial:

$$\overline{Rot} \overline{Rot} \bar{B} = \overline{grad} \overline{div} \bar{B} - \Delta \bar{B} \quad (13.1.7.b)$$

Como resultado de aplicar esta relación en (13.1.4.c) obtenemos:

$$\Delta \bar{B} = -\overline{grad} \overline{div} \bar{B} + \overline{Rot} \overline{Rot} \bar{B} = -\overline{grad} \overline{div} \bar{B} + \overline{Rot} \left( ? \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \right) \quad (13.1.7.c)$$

Para un medio poco conductor como el agua del mar ( $\sigma = 4 \text{ S/m}$ ) y para las bajas frecuencias, esta relación vale:

$$\vec{B} \approx 0 \quad (13.1.7.d)$$

ya que  $\frac{1}{\sigma} \gg \mu_0 = 5,03 \cdot 10^{-6} \text{ U.S.I.}$

Resolviendo esta ecuación y teniendo en cuenta la discontinuidad del campo en  $z=0$ , se obtienen los componentes de la inducción magnética:

$$B_y = \frac{\mu_0 J_0}{2} e^{-\frac{2\sigma|z|}{\omega}} \cos\left(\frac{2\sigma y}{\omega}\right) \quad (13.1.7.e)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 J_0}{2} e^{-\frac{2\sigma|z|}{\omega}} \operatorname{sen}\left(\frac{2\sigma y}{\omega}\right)$$

con  $\sigma = +1$  si  $z < 0$  y  $\sigma = -1$  si  $z > 0$

El campo magnético creado por  $J_x$  es una onda progresiva que se desplaza en la misma dirección y a la misma velocidad que la onda de corriente. Además, el campo es perpendicular a las corrientes. La disminución de la amplitud del campo es exponencial.

Una repartición trifásica de corrientes inductoras de pulsación  $\omega$  producirá un campo deslizando de componentes:

$$B_y = \frac{3\mu_0 J_0}{2} e^{-\frac{2\sigma|z|}{\omega}} \cos\left(\frac{2\sigma y}{\omega} - \omega t\right) \quad (13.1.7.f)$$

$$B_z = \frac{3\mu_0 J_0}{2} e^{-\frac{2\sigma|z|}{\omega}} \operatorname{sen}\left(\frac{2\sigma y}{\omega} - \omega t\right)$$

con  $\sigma = +1$  si  $z < 0$  y  $\sigma = -1$  si  $z > 0$

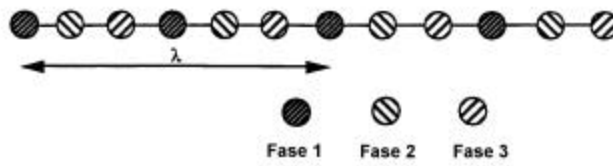


Fig. 100 : Alimentación trifásica multipolar

A su vez , el campo eléctrico vendrá dado por:

$$E_x = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 J_0}{2} e^{j \frac{2\pi z}{\lambda}} \sin\left(\frac{2\pi y}{\lambda} - \omega t\right) \quad (13.1.7.g)$$

Como el fluido se desplaza a una velocidad diferente de la inducción magnética, aparecen corrientes inducidas:

$$J_{ix} = \sigma E_x$$

Estas corrientes interactúan con el campo magnético para dar una fuerza de Laplace  $F_y$ :

$$F_y = \sigma \left(\frac{3}{2} \frac{\mu_0 J_0}{2}\right)^2 V a L_c \frac{1}{2} e^{j \frac{4\pi b}{\lambda}} \quad (13.1.7.h)$$

$L_c$  = longitud activa

$2b$  = altura

$2a$  = longitud del canal

$V = \omega \lambda / 2\pi$  (velocidad del campo deslizante respecto al fluido)

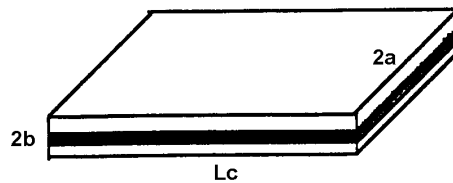


Fig. 101 : Canal de propulsión

### **13.1.8 - Condiciones previas al diseño de un motor de inducción I.M.H.D. para impulsar fluidos.**

La disposición más apropiada para mover fluidos conductores variará según la resistividad, densidad, viscosidad y permeabilidad magnética del fluido, así como con las condiciones de trabajo como la temperatura, presión, pérdidas de carga, etc. Esto hace que se tenga que tener en cuenta tanto las leyes de la inducción electromagnética como la ecuación de Bernoulli.

Daniel Bernoulli demostró que cuando las tres formas de energía inherentes de un fluido (presión, energía cinética y energía gravitatoria) se suman, esta suma es constante si los efectos por rozamiento son despreciables. En un fluido que pueda ser impulsado por un campo magnético, al interactuar el fluido con el campo magnético, estas interacciones también pueden contribuir a la energía. De esta manera si ampliamos la ecuación de **Bernoulli**, que incluya el magnetismo como la cuarta fuerza, puede escribirse:

$$\text{Presión} + \text{Energía cinética} + \text{Energía gravitatoria} + \text{Energía magnética} = C$$

Se tiene que tener en cuenta las corrientes rotóricas, sus recorridos y características, tanto en tramo principal como en los retornos, los entrehierros y recorridos magnéticos, así como las características de los elementos inductores, paso polar, número de polos y velocidad de sincronismo.

Todo esto puede aconsejar formas del inductor atípicas y simetrías diferentes a las de las máquinas eléctricas convencionales.

### **13.1.9 - Análisis de Bernoulli**

La fuerza de Laplace  $F_y$ , debida a la M.H.D., provoca un incremento de la cantidad de movimiento en el fluido, un incremento en presión estática o ambos, en función de la geometría y del diseño eléctrico realizado.

La hidrodinámica interna de la bomba de inducción, se puede estudiar con la ecuación de la cantidad de movimiento unidimensional, para un fluido con fricción,

como punto de partida:

$$\frac{d}{dy} \left( p + \frac{1}{2} \rho V^2 \right) = F_y \left( \frac{1}{2} \rho V^2 \right) \frac{4}{D_H} C_f \quad (13.1.9.a)$$

$p$  = presión estática

$\rho$  = densidad del fluido

$V$  = velocidad del fluido

$F_y$  = fuerza de Laplace

$D_H$  = diámetro hidráulico

$C_f$  = coeficiente de fricción

Si el fluido es incompresible y no viscoso, integrando la ecuación de la cantidad de movimiento obtenemos la ecuación de Bernoulli. Para un fluido que circula desde una sección  $A_a$  hasta una sección  $A_b$ , la ecuación de Bernoulli es:

$$p_a + \frac{1}{2} \rho V_a^2 + \int_a^b F(y)_y dy = p_b + \frac{1}{2} \rho V_b^2 \quad (13.1.9.b)$$

Donde cada subíndice se refiere a la sección respectiva. Para resolverla para dicho fluido, será necesario la ecuación de continuidad:

$$V_a A_a = V_b A_b \quad (13.1.9.c)$$

### 13.1.10 - Limitaciones actuales

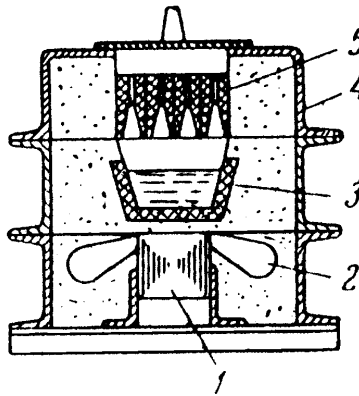
La IMHD tiene en su contra las dificultades de la realización de cables superconductores para el transporte de corrientes alternas superiores al kiloamperio y el elevado valor de las inductancias de los inductores, lo que comporta serios inconvenientes para la fuente de alimentación (potencia reactiva del inductor extremadamente elevada).

La corriente necesaria en la vena líquida aconseja trabajar con frecuencias elevadas. Esto plantea un dilema, ya que los superconductores no permiten trabajar a estas frecuencias y los campos magnéticos necesarios aconsejan precisamente el empleo de superconductores.

### 13.1.11 - Antecedentes

#### Caso 1

En la sección de fundición para el moldeo de bloques para los motores de una fábrica de coches de Leningrado se utilizó en el año 1962 un motor lineal para separar la escoria de la fundición y mantener el caldo fundido, además de hacerlo circular. Se trata de una máquina de inducción unilateral para impulsar el acero líquido remontando una pendiente de inclinación  $3^\circ$  (fig.102). El mismo acero líquido constituye el rotor, pues su temperatura está muy por encima del punto de Curie y no es magnético. Su resistividad es mucho mayor que la del cobre o el aluminio, y se halla separado de los bobinados del estator por una considerable capa de material refractario para impedir que los deteriore ?16?.



- 1 : Chapas magnéticas
- 2 : Devanado inductor
- 3 : Inducido (acero fundido), aislado con material refractario
- 4 : Recipiente (atmósfera controlada)
- 5 : Material refractario

Fig.102 : Bomba para impulsar acero líquido.

En la práctica, el entrehierro total entre la base del caudal de acero y la superficie del estator es de unos 6 cm. El estator tiene un ancho de 13 cm con paso polar de 18 cm y 32 polos en toda su longitud, del orden de 6 m.

Para una potencia absorbida de 60 kW este motor lineal sólo desarrolla 50 W . Los devanados del estator están contruidos con tubos de cobre refrigerados por agua,

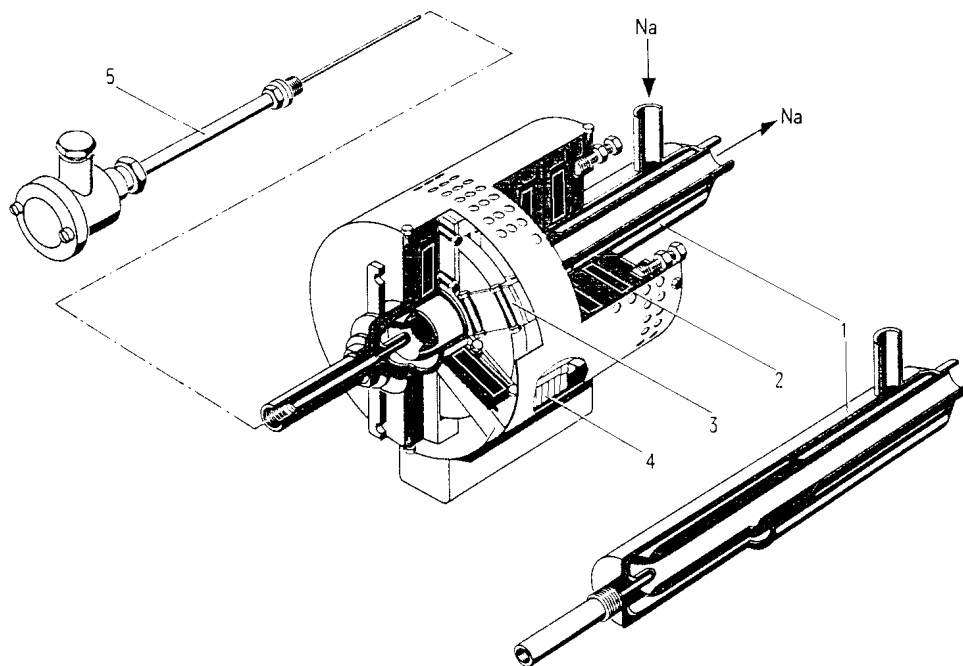
y, a pesar de un rendimiento total menor del 0,1 %, el aparato presenta las siguientes ventajas:

- 1- Los gastos del transporte del acero líquido son la mitad que en cualquier otro sistema.
- 2- Los gastos de mantenimiento se reducen en 40%.
- 3- La productividad del trabajo se multiplica por 3.
- 4- El acero se depura, pues la escoria no conductora no es impulsada y cae al fondo de la pendiente, donde se elimina fácilmente.

Este ejemplo pone de relieve la importancia de considerar tanto los aspectos energéticos como los económicos de forma global. Aunque este motor tenga un rendimiento muy bajo como tal, al introducirse en una cadena de trabajo en unas condiciones especiales, resulta que hace aumentar el rendimiento de todo el proceso productivo.

## Caso 2

En circuitos primarios de intercambio de calor de algunas plantas nucleares, se han utilizado bombas para impulsar metal líquido (sodio fundido) (fig.103). La eficiencia de estas bombas es relativamente baja al igual que los motores lineales. Sin embargo al tratarse de un intercambiador de calor, las pérdidas por efecto Joule se aprovechan también para el objetivo final de calentar el vapor ¿12?.



- 1 - Conductos de la bomba
- 2 - Devanado inductor
- 3 - Paquete magnético
- 4 - Caja de terminales
- 5 - Termopar.

Fig. 103: Construcción básica de una bomba de inducción para transportar  $6 \text{ m}^3/\text{h}$  de sodio fundido.

Se trata de un motor de inducción lineal tubular con el inductor externo, como puede observarse en la figura.

El campo magnético atraviesa de forma radial la cavidad externa en la que el sodio tiene el camino de ida, impulsado por el campo magnético. En la cavidad central el



campo magnético toma el sentido axial y no impulsa al sodio sino que sólo lo calienta por corrientes inducidas.

La disposición concéntrica de los tubos que conforman el inducido hacen que en ellos se generen muchas pérdidas por corrientes inducidas. Esto es muy útil durante los procesos de arranque del sistema, cuando el sodio está aún en estado sólido y así se funde.

Es una aplicación que permite la impulsión de un líquido altamente peligroso de una manera sumamente segura y fiable dada la hermeticidad de los tubos. En el caso de tener que reparar la bomba, no es necesario desmontar el sistema de conductos.

Esta bomba, alimentada con un sistema trifásico a 190V-50 Hz, consume 13 A y absorbe 2,35 kW aunque la máxima potencia transferida al metal líquido es de 0,2 kW. El rendimiento es del 8,3%, el factor de potencia vale 0,55, tiene 2 polos, el caudal máximo a transportar es de 6 m<sup>3</sup>/h a la presión de 1,2 bar. La temperatura de funcionamiento es de 473 a 773 °K .

### Caso 3

En 1994 se publicó un estudio en la UPC [2], donde se analizaba una topología de un motor lineal tubular, similar al de la figura 104. El núcleo central es ferromagnético con una sección suficientemente grande que permite “canalizar” correctamente el campo magnético.

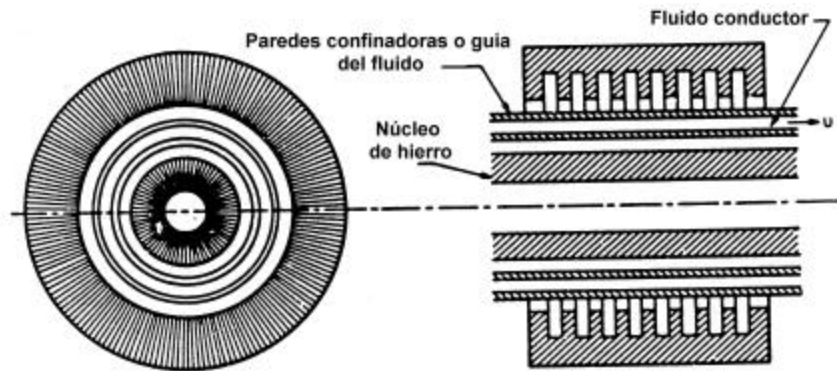


Fig. 104: Motor lineal tubular.

Se trata del primer intento de construcción IMHD realizado por el equipo dirigido por el Dr. Ricard Bosch.

Las aportaciones principales de aquella tesis han sido los materiales empleados y los procedimientos utilizados.

En cuanto a materiales, cabe citar el circuito eléctrico formado por cobre tubular refrigerado directamente por su interior con agua a presión.

Manteniendo suficientemente cortos los tramos hidráulicos, puede llegarse a trabajar con densidades de corrientes de unos  $200 \text{ A/mm}^2$ .

El material magnético empleado consistía en hierro en polvo aglomerado con resinas. Tenía una doble intención: por una lado disminuir las pérdidas por corrientes parásitas en el hierro, permitiendo así el trabajo con altas frecuencias; por otro lado, se podía cambiar el procedimiento constructivo de los prototipos, diferente de la forma tradicional. Esto se debía a la formación final del circuito magnético adaptado a las bobinas por colada como en el caso del hormigón armado (fig.105).

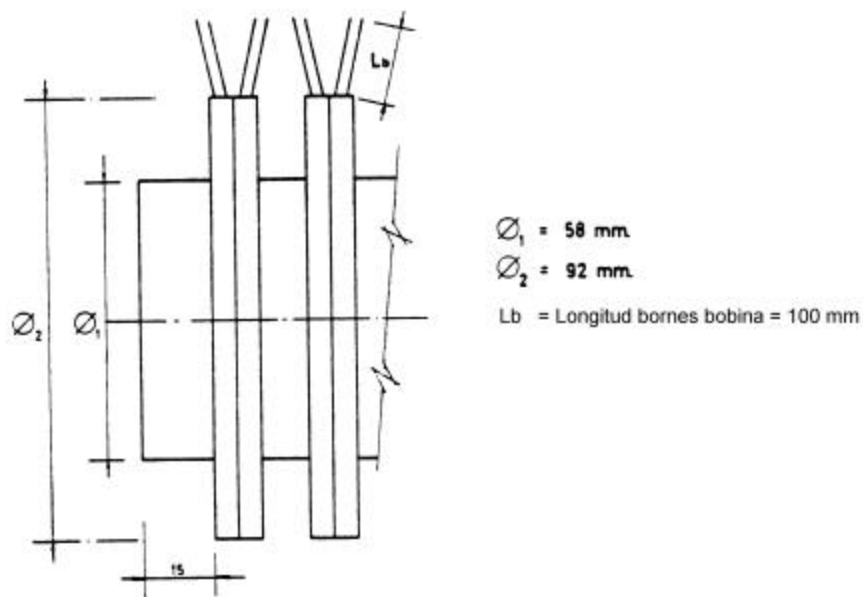
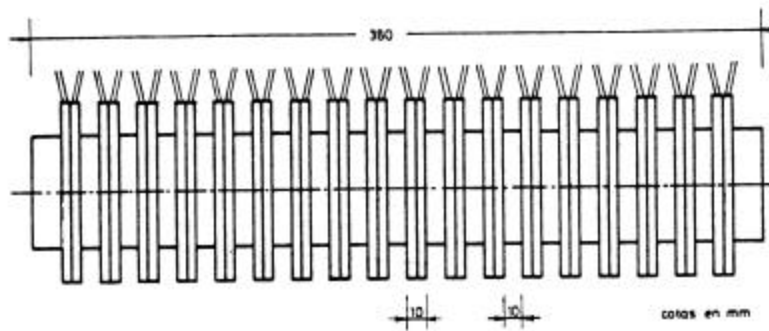


Fig. 105 : Prototipo motor lineal tubular ??

Después de realizar convenientemente las conexiones eléctricas de las bobinas, éstas se conectaron a una fuente de corriente elevada y muy baja tensión a 50 Hz.

Se realizaron diferentes pruebas de tracción con el prototipo con diferentes conexiones eléctricas, siendo una de estas la conexión en triángulo de paso corto, con lo que se consiguió un motor lineal tubular trifásico de tres pares de polos, con una distancia polar de 60 mm y con una velocidad de sincronismo de 3 m/s (Fig.106).

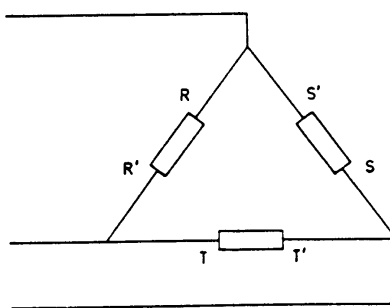
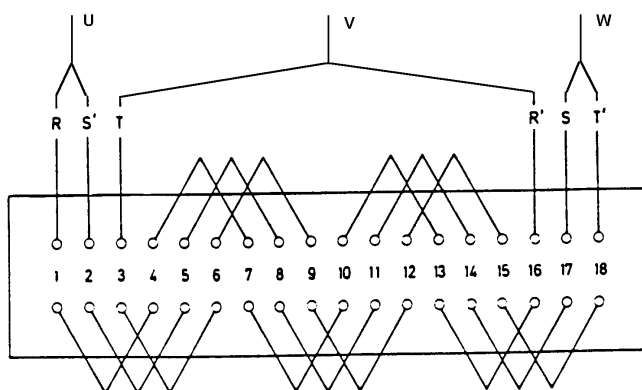


Fig.106 : Esquema eléctrico de un prototipo 22?, conexión en triángulo, paso corto.

Para realizar mediciones se utilizó un tubo de aluminio que se introdujo en el interior del inductor para realizar funciones de inducido. Se midió la fuerza ejercida sobre el tubo de aluminio con núcleo de “poliferro” para disminuir la reluctancia magnética, y sin núcleo. Los resultados principales son los mostrados en la tabla 2 y representados en la fig.107.

Núcleo	Corriente por fase (A)	Tensión por fase (V)	Fuerza sobre el tubo de aluminio (N)
No	450		19,6
	600		51,0
	750		71,6
Si	450	9,6	117,7
	620	15,0	304,1

Tabla 18: Relación corriente fase, tensión eficaz por fase y fuerza

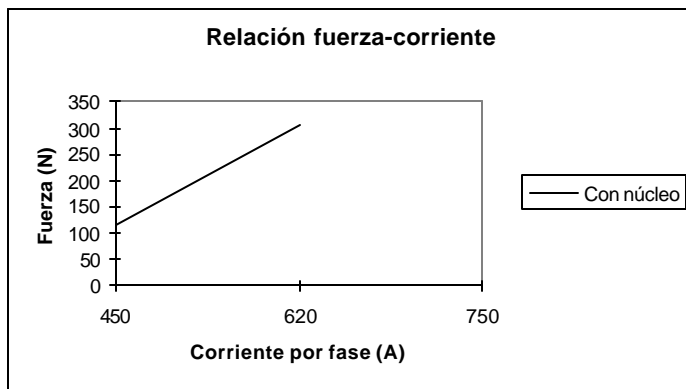
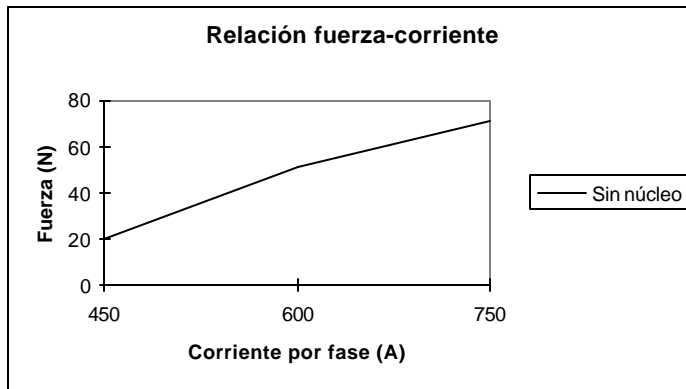


Fig. 107: Relación fuerza desarrollada - corriente por fase

Se estudió la actuación con mercurio observándose que se producían circulaciones internas.

También se estudió el comportamiento con soluciones de cloruro sódico, donde se observó una ligera concentración salina en uno de los extremos.

Una vez finalizada la tesis doctoral de Ramón Grau, se prosiguieron los estudios con mejores medios sobre dicho prototipo y se continuó el análisis del material empleado. La permeabilidad magnética del “poliferro” se pudo comprobar que era muy baja, de tan sólo  $\mu_r = 2$ , sobre todo trabajando a la frecuencia de 50 Hz. El polvo magnético empleado resultó no tener la estructura cristalina adecuada. Tenía estructura austenítica que tiene comportamiento amagnético.

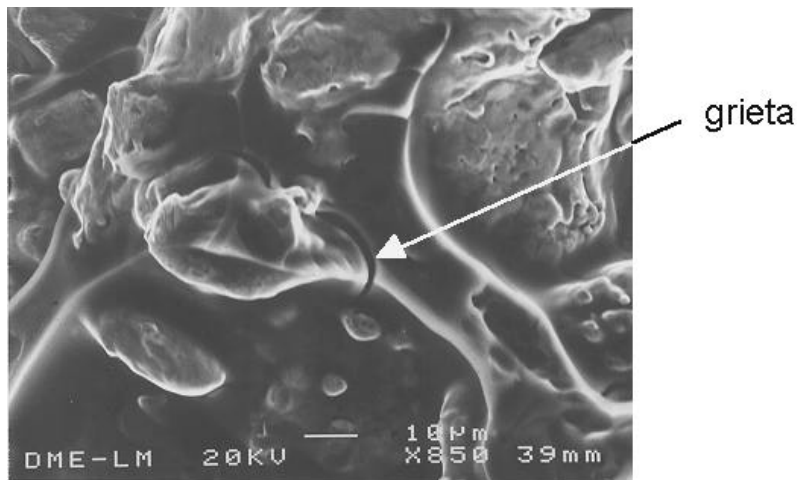


Foto 21: Fotografía del “poliferro”, realizada en el departamento de materiales (UPC) por la Sra. Montse Marsal.

En esta fotografía se puede comprobar que las partículas de hierro están distantes entre sí, y unidas mediante un adhesivo “TRITON H-31”. Se puede apreciar una grieta en el adhesivo producida por la contracción volumétrica al endurecerse.

El “poliferro” no tiene el tratamiento térmico adecuado y además tiene una capa granular de óxido, que no debería existir.