

6. MODELOS ANALIZADOS.

6.1. Prototipos desarrollados en el DEE.

Los prototipos se iniciaron con la tesis doctoral de Ricard Bosch [112] con el prototipo B-1 compuesto de dos inductores planos ABB con un disco de aluminio entre ellos, en configuración NN ó NS.

El siguiente fue el B-2, que ampliaba las prestaciones del B-1 mediante la inclusión de cabezas de bobina en el rotor de aluminio.

El siguiente paso, el B-3 añadió estabilizadores a la levitación del rotor, con un rediseño de las cabezas de bobina del rotor.

Todos los prototipos B-3 estaban compuestos por inductores a base de material ferromagnético con ranuras donde se alojaban las bobinas inductoras.

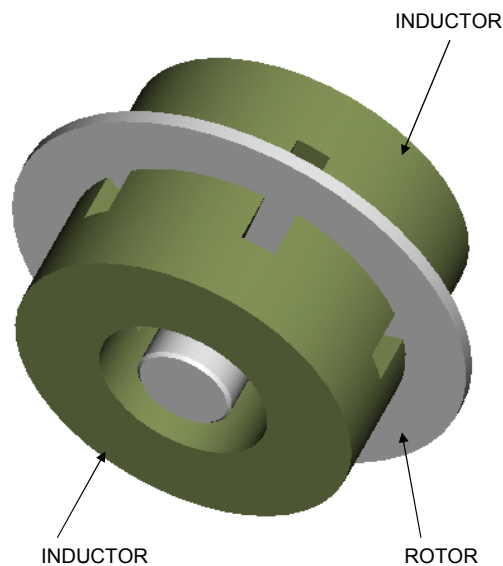


Figura 107. Máquina B-1.

El paso siguiente fueron los prototipos RB, que dejaron de incorporar ranuras en los inductores, pasando a un diseño de inductores toroidales ferromagnéticos, con conductor bobinado con lanzadera directamente sobre ellos.

Todos los RB han tenido en común unos valores de diseño inicial comunes:

$$K_r = 0.65, p = 20$$

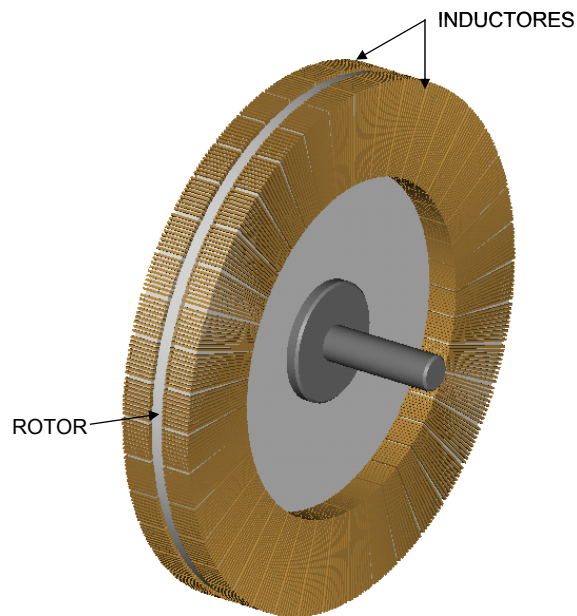


Figura 108. Máquina RB.

El siguiente paso ha sido eliminar completamente el hierro de la máquina bobinando los inductores sobre un núcleo de madera, con el fin de que actúe únicamente como soporte de las bobinas inductoras. En este caso se emplea un único inductor y el rotor de aluminio envuelve completamente al estator. Los parámetros de diseño se han seguido manteniendo iguales.

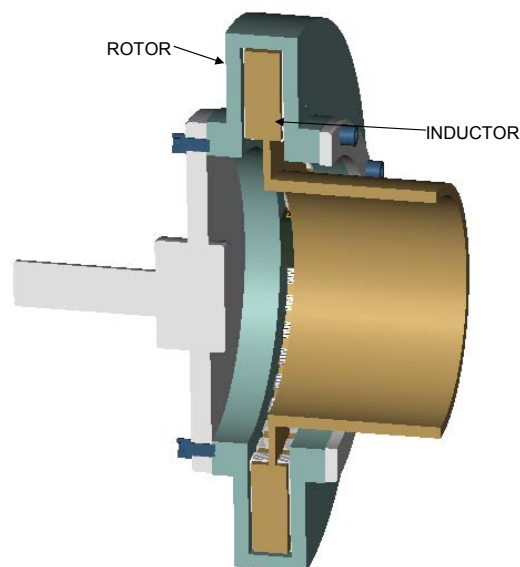


Figura 109. Máquina DASER.

6.2. Descripción del modelo tridimensional.

La máquina analizada es una máquina de flujo axial compuesta por (ver figura 102)

- 2 semiestatores toroidales de material ferromagnético.
- 1 rotor de aluminio en forma de disco.
- 2 devanados inductores. Uno en cada semiestátor.

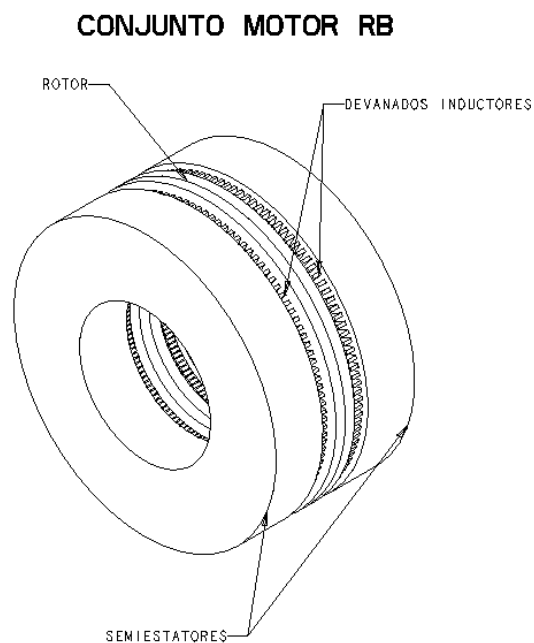


Figura 110. Motor de flujo axial analizado.

No se han tenido en cuenta las cabezas de bobina de los dos devanados inductores ni del rotor. Es habitual encontrar cabezas de bobina rotóricas den forma de T, con el fin de permitir el retorno de las corrientes rotóricas en una zona fuera de la influencia de los devanados inductores [115].

La razón que ha llevado a la simplificación del modelo es evitar la excesiva complejidad de la geometría. Cuando se emplean geometrías muy complicadas se pueden producir errores de cálculo debido a la aparición de discontinuidades entre elementos, o distorsiones de la malla

CONJUNTO MOTOR RB VISTA DESPIECE

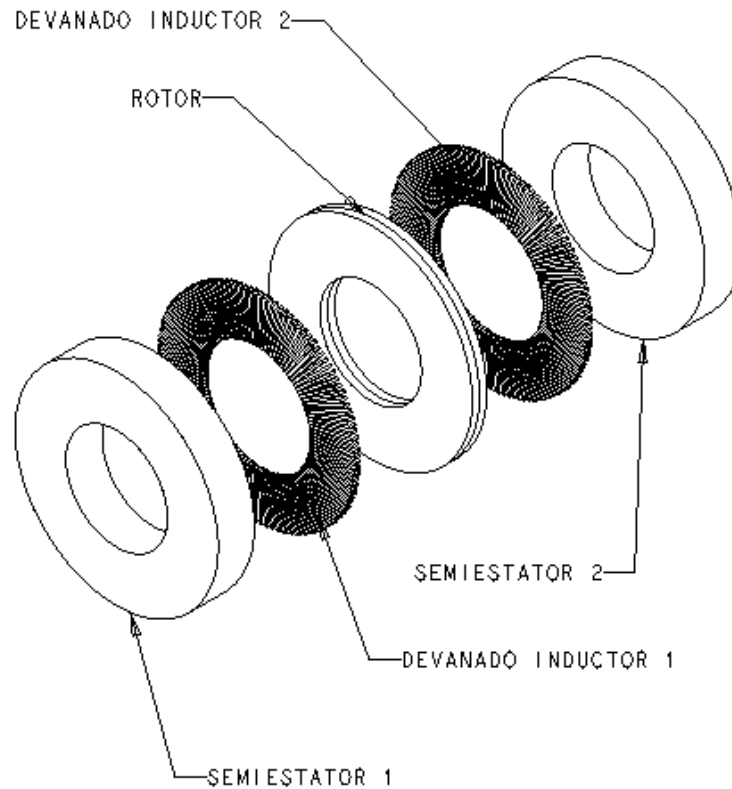


Figura 111. Vista despiece de la máquina.

Otro factor a tener en cuenta es la memoria disponible, que en el caso del análisis que nos ocupa llegaba a generar ficheros de 600 MB durante los procesos de triangulación de la matriz de la ecuación (6.57) previa a la solución. Se probaron geometrías más complicadas, dando como resultado un desbordamiento del sistema. Por lo que se optó por este modelo simplificado.

No hay que olvidar que los análisis que se presentan son análisis tridimensionales de la máquina, lo que supone que el número de elementos crece de manera exponencial, respecto a un análisis bidimensional típico. Que, todo se ha de decir, hace más simplificaciones que las expuestas para este modelo.

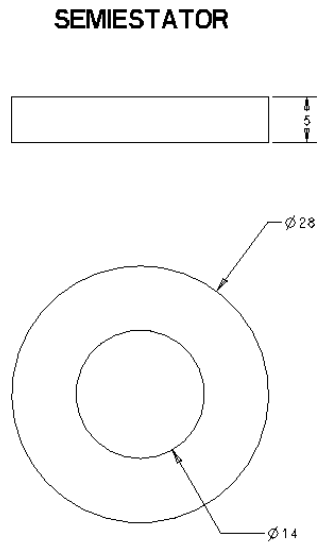


Figura 112. Dimensiones de un semiestátor. Cotas en mm.

Los materiales empleados han sido los siguientes:

- Semiéstatores: hierro, permeabilidad $\mu_R=2.000$.
- Devanados inductores: cobre $\mu_R=1$, $\rho=0.1725 \cdot 10^{-7} \Omega m$
- Rótor: aluminio $\mu_R=1$, $\rho=0.2715 \cdot 10^{-7} \Omega m$.
- Entrehierro: aire $\mu_R=1$.

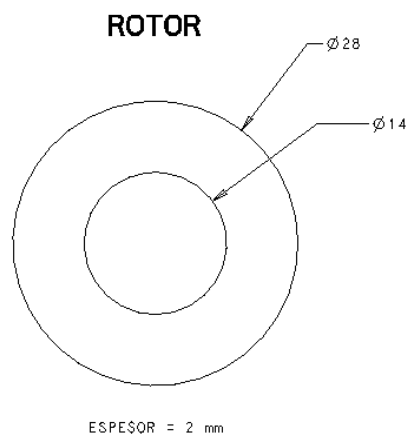


Figura 113. Dimensiones del rótor. Cotas en mm.

DEVANADO INDUCTOR.

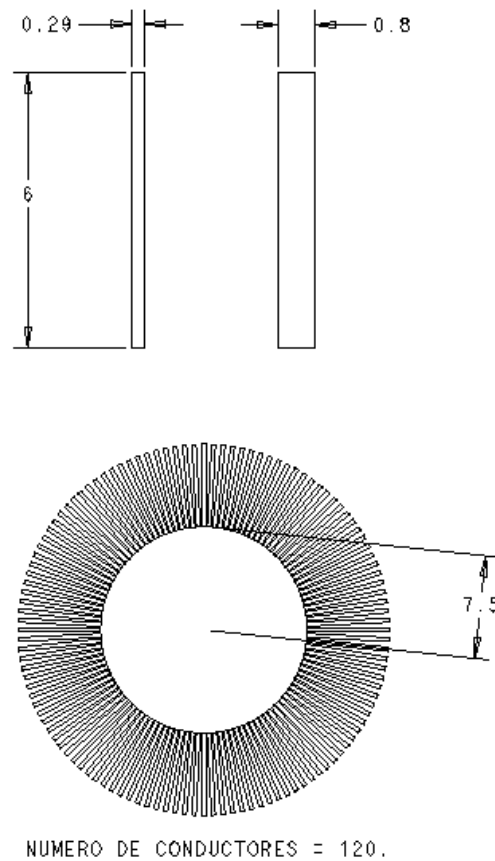


Figura 114. Detalle del devanado inductor. Cotas en mm.

Los devanados inductores se han simulado como conductores de cobre de forma de barra rectangular con un único conductor por fase y polo. El número de pares polos ($2p$) de la máquina analizada es de 20, lo que da, empleando un sistema trifásico equilibrado de corrientes, un total de 120 conductores repartidos entre los 360° . Por tanto los datos geométricos del motor son:

- Pares de polos (p) = 20.
- Paso polar (τ_p) = 9° .
- Conductores por fase y polo (k) = 1.
- Número de fases = 3.

Se ha iniciado el análisis por un número de pares de polos $p=20$, debido a que es el número de polos de las máquinas de flujo axial en desarrollo en el Departament d'Enginyeria Eléctrica de l'Escola

Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona (UPC). También es el número de polos que parece ser el óptimo de acuerdo a las referencias bibliográficas obtenidas [118] [119] .

DETALLE DEL ENTREHIERRO

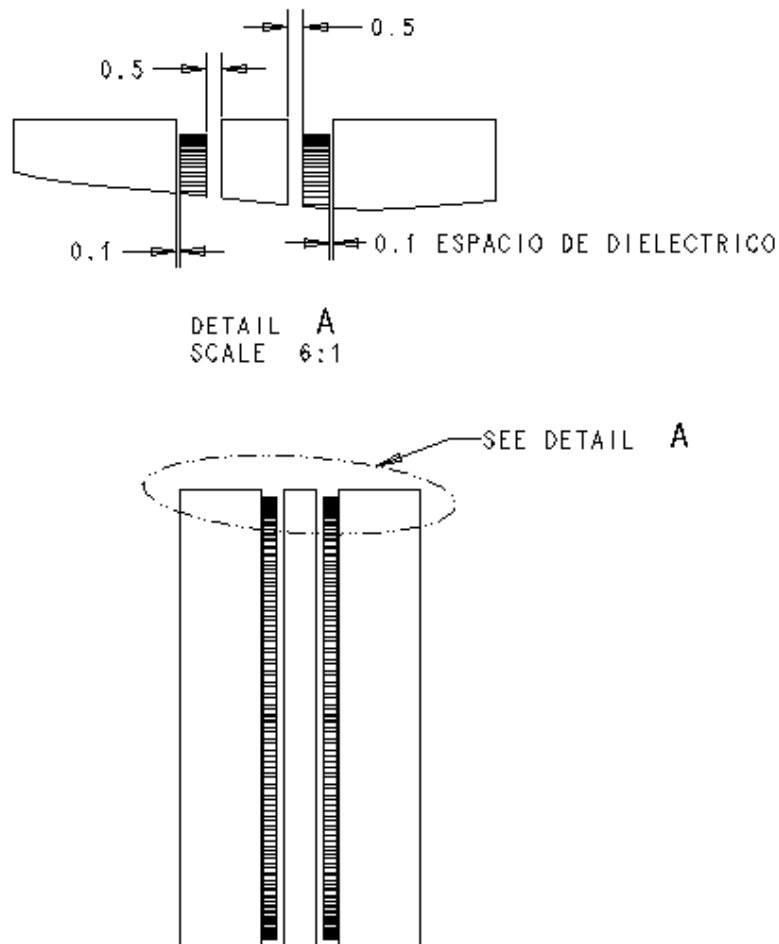


Figura 115. Entrehierro de la máquina RB.

Dado que la geometría que se ha analizado presenta simetrías evidentes, tanto en el plano medio de la máquina, como la repetición de pares de polos que se produce cada 18° de giro; se ha analizado únicamente un par de polos de un semiestátor.

El análisis se reduce de forma considerable, ya que se analiza una porción de un arco de 18° y de la mitad de ancho, ya que se ha partido el rotor por la mitad. En las figuras que siguen a continuación se puede ver de forma detallada la geometría que se ha mallado.

Los resultados que se presentan se basan en la porción de 18° analizada, aunque se presentan también en su totalidad, puesto que se ha repetido la solución 20 veces batiendo los 360° de la circunferencia.

GEOMETRIA MALLADA. ANALISIS DE 1 PAR DE POLOS, 1 SEMIESTATOR Y MEDIO ROTOR.

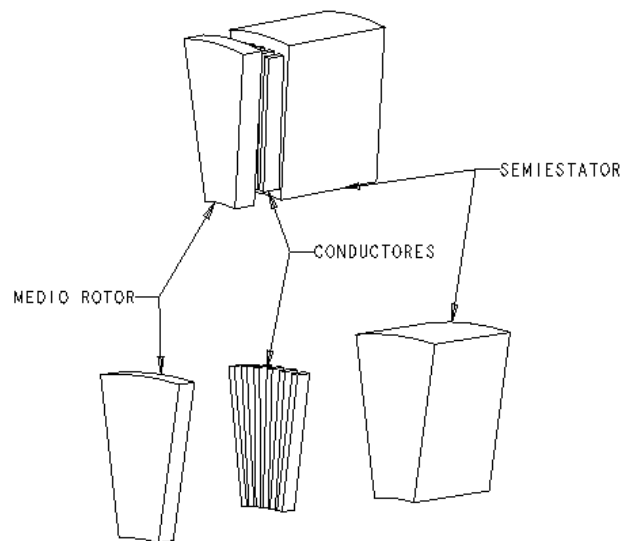


Figura 116. Sector de la máquina analizada. Un par de polos de un semiestátor.

Se ha supuesto, por tanto, que la simetría entre ambos semiestátors es perfecta y que a cada polo norte de un semiestátor le corresponde un polo norte en el otro semiestátor. Es decir que el flujo de un polo sur de un semiestátor se cierra a través del polo norte del mismo semiestátor.

Los materiales empleados han sido los siguientes:

- Semiestátors: hierro, permeabilidad $\mu_R=2.000$. No se tienen en cuenta saturaciones.
- Devanados inductores: cobre $\mu_R=1$, $\rho=0.1725 \cdot 10^{-7} \Omega m$
- Rótor: aluminio $\mu_R=1$, $\rho=0.2715 \Omega m$.
- Entrehierro: aire $\mu_R=1$.

En las figuras siguientes se describen las medidas de las porciones de estator y rotor analizados. A ellas hay que añadirles 6 conductores, 3 por polo, y el aire comprendido entre ellos, que también precisa ser incluido en el análisis.

Las unidades empleadas en el análisis son unidades SI, ya que, habitualmente, los programas de elementos finitos no trabajan con unidades. Tiene que ser el analista el que determine el sistema de unidades en el que quiere trabajar e introduzca los datos en consonancia con el sistema escogido.

**DIMENSIONES DEL MEDIO ROTOR
POR PAR DE POLOS.**

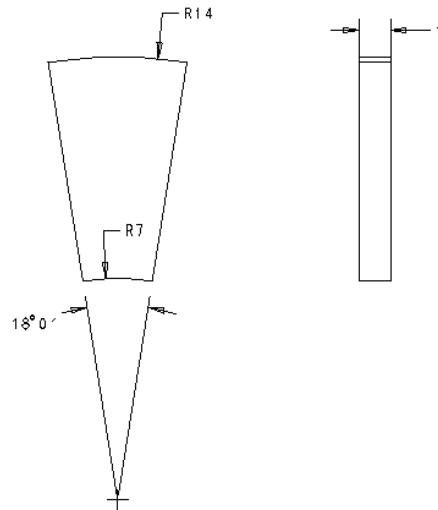


Figura 117. Dimensiones del medio rotor analizado. p=20.

**DIMENSIONES DEL SEMIESTATOR
POR PAR DE POLOS.**

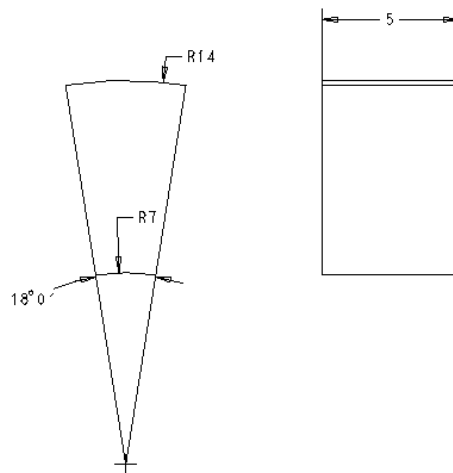


Figura 118. Dimensiones de la porción de semiestator analizado. p=20.

6.3. Recursos empleados.

6.3.1. Equipo.

Para realizar los análisis por elementos finitos se ha empleado una estación de trabajo "Ultra 30" de Sun Microsystems con monitor de 21 pulgadas. El software empleado ha sido la versión 5.6 del programa ANSYS 5.6 del que se disponían licencias para cálculo Estructural y EMAG, el módulo de electromagnetismo.

Los modelos analizados han sido creados empleando el programa Pro/ENGINEER versión 2000i. Programa de diseño 3D. Los modelos tridimensionales generados se han creado de forma paramétrica para poder modificar dimensiones del motor, para la posterior ampliación del análisis. Los modelos creados se han exportado en formato IGES, formato reconocido por ANSYS y que no ha dado ningún problema de importación.

Características de la estación de trabajo:

- Descripción: Familia UltraSparc. Ultra 30 modelo 300
- Procesador: UltraSparc II
- Velocidad de reloj: 300 MHz.
- Caché procesador: 16KB instrucciones, 16kB datos.
- Caché externo: 2 MB.
- Gráficos: VIS (Visual Instructions Set). Emplea sistema Creator 3D para manejo de gráficos a alta velocidad.

Características del software ANSYS-EMAG.

- Cálculo MEF magnético en régimen estático, magnetostática. Posibilidad en 2D y 3D.
- Cálculo MEF eléctrico en régimen estático, electrostática. Posibilidad en 2D y 3D.
- Cálculo MEF en régimen senoidal permanente. Posibilidad en 2D y 3D. Supone el campo senoidal.
- Cálculo MEF en régimen transitorio. Posibilidad en 2D y 3D.

- Cálculos con elementos en movimiento, admite rotaciones alrededor de un eje o desplazamientos lineales. La única condición es que la sección transversal del componente móvil no puede presentar discontinuidades.
- Cálculos no lineales mediante la introducción de curvas B-H de materiales.
- Posibilidad de emplear imanes permanentes.
- Cálculo de problemas para generar respuestas en una banda de frecuencias. Análisis espectral.
- Representación de resultados mediante FFT.

6.3.2. Referencias de simulaciones MEF.

Se han encontrado variadas referencias de cálculo de diferentes características de máquinas axiales. Las características de estas referencias son:

- Cálculos siempre son magnetostáticos.
- En 2 ó 3 dimensiones dependiendo de los autores.
- Se simulan diferentes posiciones del rotor de la máquina siempre bajo un campo magnetostático.
- Los softwares empleados son Maxwell 3D de ANSOFT o Flux3D.
- Ninguno de ellos permite simulaciones electrodinámicas.

El listado de referencias donde se emplea herramientas MEF son las siguientes:

- Ref [28] [34] [44] [54] [55] : Aydin, Lipo et al. Emplean ANSOFT 3D.
- Ref [50] Luo, Huang, et al. Emplean ANSOFT 3D.
- Ref [64] [72] , Caricchi, Crescimbin et al. Sin referencia de Software empleado. Realizan MEF en 2 dimensiones
- Ref. [7] [33] , Barakat, et al. Emplean Flux3D.
- Ref. [1] [4] [35] [43] [85] varios autores. Trabajan en 2 y 3 dimensiones.

6.4. Elementos y mallado de los modelos.

6.4.1. Elementos empleados en el mallado.

El elemento empleado ha sido el elemento ANSYS SOLID117, recomendado para análisis de campos magnéticos sobre modelos tridimensionales. Viene definido por 20 nodos y tiene 12 grados de libertad de la variable potencial vector \vec{A} , una en cada nodo intermedio.

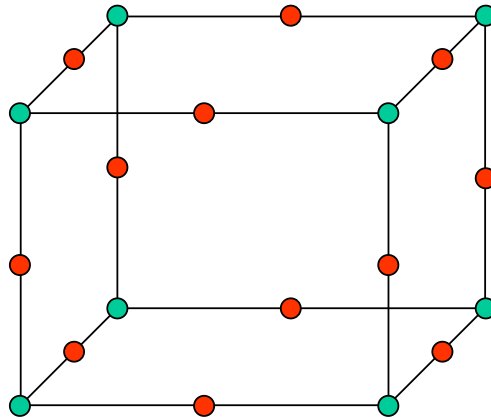


Figura 119. Elemento SOLID117 para cálculos magnéticos.

En análisis dinámico se añaden 8 variables flujo (en la forma de integral temporal del potencial eléctrico escalar V).

Se basa en la formulación descrita en (5.2) y se aplica al cálculo de campos magnéticos a baja frecuencia, magnetostática y cálculo en régimen senoidal permanente. Permite trabajar con elementos no lineales definidos por curvas B-H, así como el empleo de imanes permanentes mediante la introducción de curvas de magnetización permanente.

La geometría puede derivar a formas piramidales o tetraédricas como las descritas en 5.2.8.2. Se pueden aplicar al elemento efectos de velocidad mediante la introducción de velocidades lineales (V_x, V_y, V_z) o mediante la introducción de velocidades de rotación ($\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$) referidas a un sistema de coordenadas cartesianas localizado en un punto determinado (X, Y, Z).

En el análisis que nos ocupa, éste punto estaba localizado en el eje de rotación de la máquina y la única velocidad angular aplicada ha sido Ω_z .

$$X = 0 \quad Y = 0 \quad Z = 0$$

$$\Omega_x = 0 \quad \Omega_y = 0 \quad \Omega_z \neq 0$$

Hay que tener en cuenta una restricción muy importante, que es el hecho de que se cumpla obligatoriamente la ecuación de continuidad (apartado 5.2), puesto que si no se cumple el programa puede dar resultados erróneos sin avisar.

Se asegura el cumplimiento de esta restricción haciendo que los conductores sean de sección transversal constante y acoplando la variable potencial vector en todos los nodos principales del elemento. Una vez acoplados se aplica el valor de corriente que se desee a uno de los nodos acoplados. El acoplamiento de la variable potencial vector obliga a que el potencial eléctrico en esa cara del componente sea el mismo en todos los nodos, con lo que se asegura la ecuación de continuidad.

6.4.2. Mallado del semiestátor.

El modelo analizado está constituido por 8.538 elementos tipo SOLID117, descrito en el apartado anterior. El número total de nodos es de 15.120, por lo que muchos elementos han degenerado en elementos piramidales o trapezoidales, como permite SOLID117. Presenta 2.257 restricciones aplicadas sobre los nodos y que se describen en el capítulo 8.

En la imagen siguiente se muestra el aspecto del mallado del conjunto, hay que recordar que el aire también hay que mallarlo y asignarle propiedades.

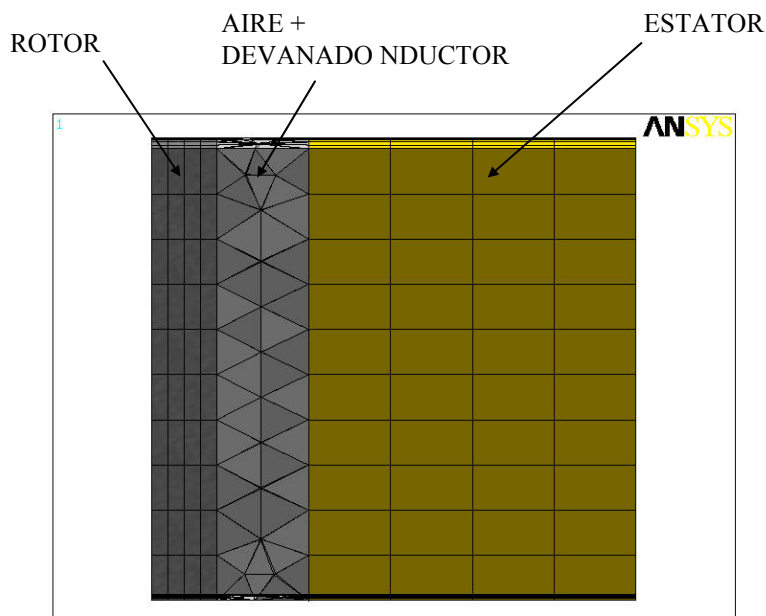


Figura 120. Mallado del par de polos analizados de la máquina de flujo axial.

El semiestátor está compuesto por 440 elementos, todos ellos de forma rectangular y formados por 20 nodos cada una. El número total de nodos del estator es de 2.393.

En la imagen siguiente se muestra el aspecto del semiestátor representado con simetría cíclica. En las dos imágenes siguientes se puede ver el aspecto del par de polos analizados.

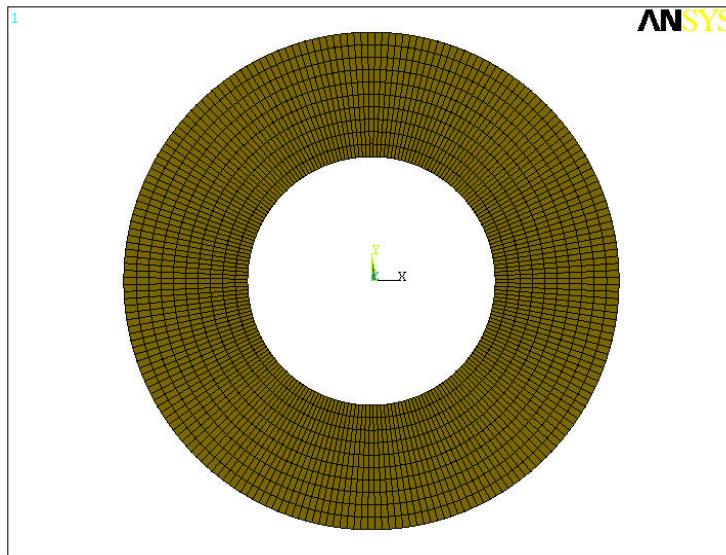


Figura 121. Aspecto del semiestátor mallado. Representación de simetría cíclica de los 20 pares de polos.

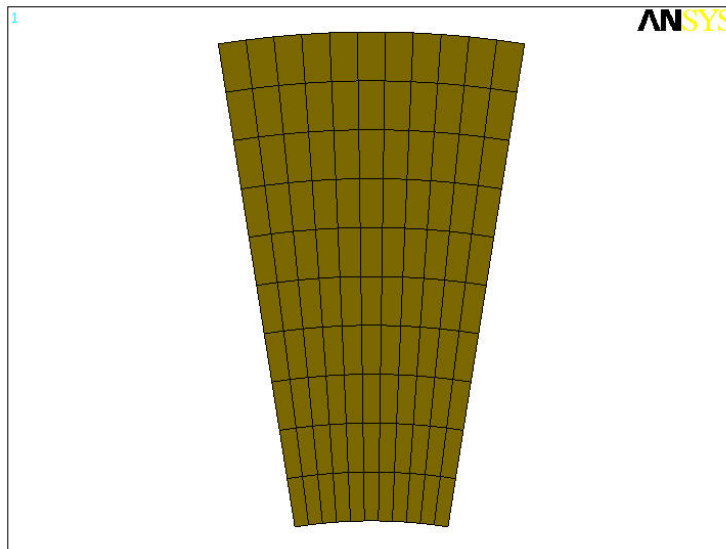


Figura 122. Vista frontal del mallado del par de polos analizados.

Como se puede comprobar de las figuras, el mallado se ha realizado haciendo un cambio a un sistema de coordenadas cilíndrico. El mallado se ha realizado haciendo las divisiones de las líneas del

contorno una a una, los arcos se han dividido en 11 tramos , la dimensión radial en 10 tramos y la profundidad en 4 tramos.

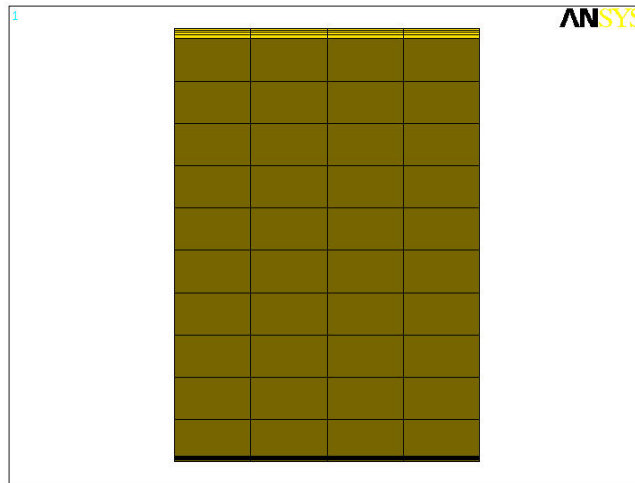


Figura 123. Vista lateral del semiestátor mallado. Dividido en 4 tramos.

6.4.3. Mallado del devanado inductor.

El devanado inductor está compuesto por 2003 elementos y 4.702 nodos. Los elementos han degenerado a tetraedros de 10 nodos debido a que el mallado del aire ha tenido que realizarse a partir también de tetraedros de 10 nodos.

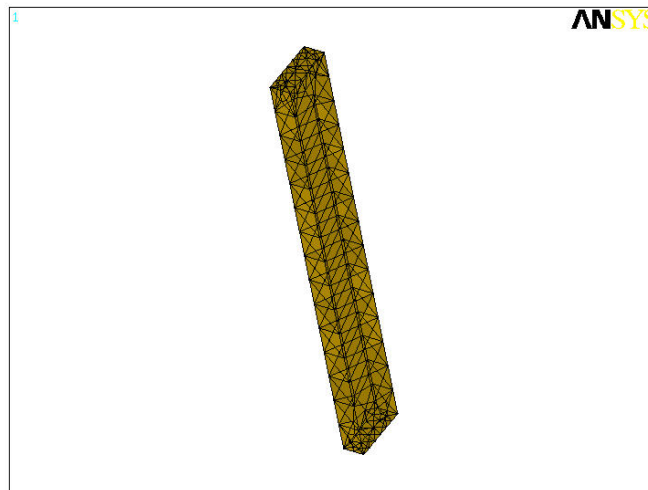


Figura 124. Aspecto del mallado de uno de los conductores del devanado inductor. Mallado a base de tetraedros de 10 nodos.

El mallado se realizó empleando el “mallado inteligente” (smartsizing) de que dispone el pre-procesador de ANSYS. Este asistente se emplea cuando se desea un mallado rápido o, como en el

caso que nos ocupa, cuando el mallado viene condicionado por otro mallado complejo que dificulta el control manual del mismo.

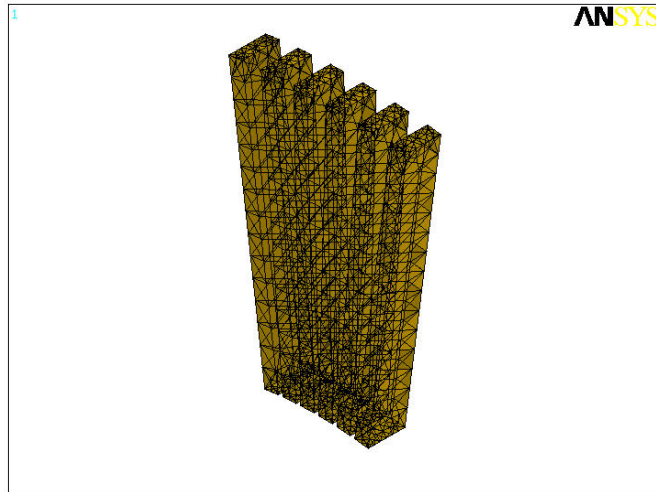


Figura 125. Aspecto del mallado de los 6 conductores de un par de polos del devanado inductor. Mallado a base de tetraedros de 10 nodos.

6.4.4. Mallado del rotor.

El rotor está compuesto por 440 elementos que contienen 2.393 nodos. Los elementos son de 20 nodos y se han conseguido haciendo una división manual del contorno de la porción de rotor analizado, es decir, se ha tratado igual que el semiestátor.

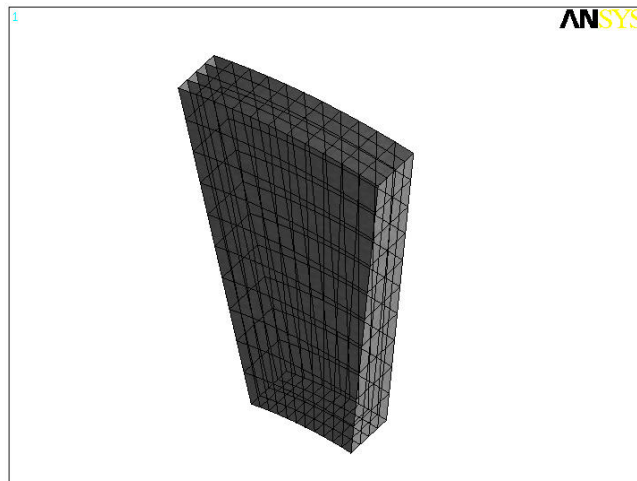


Figura 126. Aspecto del mallado del rotor. Elementos rectangulares de 30 nodos.

Los arcos se han dividido en 11 tramos, las líneas radiales en 10 tramos y la profundidad en 4. Con ello se ha conseguido un mallado uniforme y sin distorsiones.

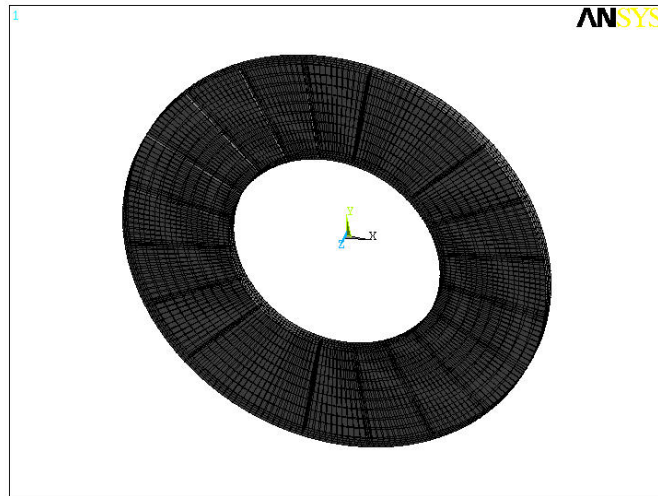


Figura 127. Aspecto del mallado del rotor. Representación en simetría cíclica de los 20 pares de polos.

En la presentación de los resultados se verá que existe tanto gráficos de resultados por par de polos como el conjunto del rotor. Esto se ha conseguido aplicando simetrías cíclicas para los 20 pares de polos del motor.

6.4.5. Mallado del aire.

El mallado del aire se ha realizado empleando la herramienta de “mallado inteligente” del pre-procesador de ANSYS. Dando como resultado un mallado de 5.655 elementos con 9.866 nodos.

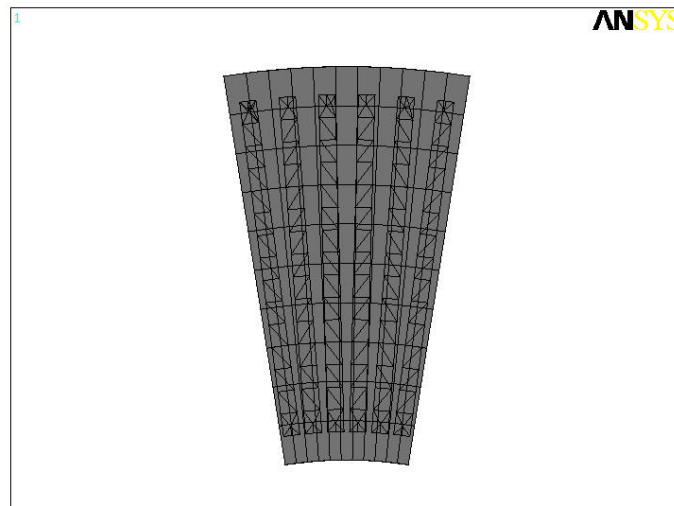


Figura 128. Aspecto del mallado del aire de un par de polos de la máquina.

Como se puede ver es el mallado más denso de todos y es debido a la geometría adoptada en la que se ha tomado como aislante de los conductores una capa de 0.5 mm de aire, para que no estuvieran en contacto con el hierro del semiestátor.

Como se puede ver en el capítulo 6, el tamaño de los conductores es inferior a rotor y semiestátor. La razón es permitir la existencia de cabezas de bobina en el rotor por el que pudieran retornar las corrientes rotóricas.

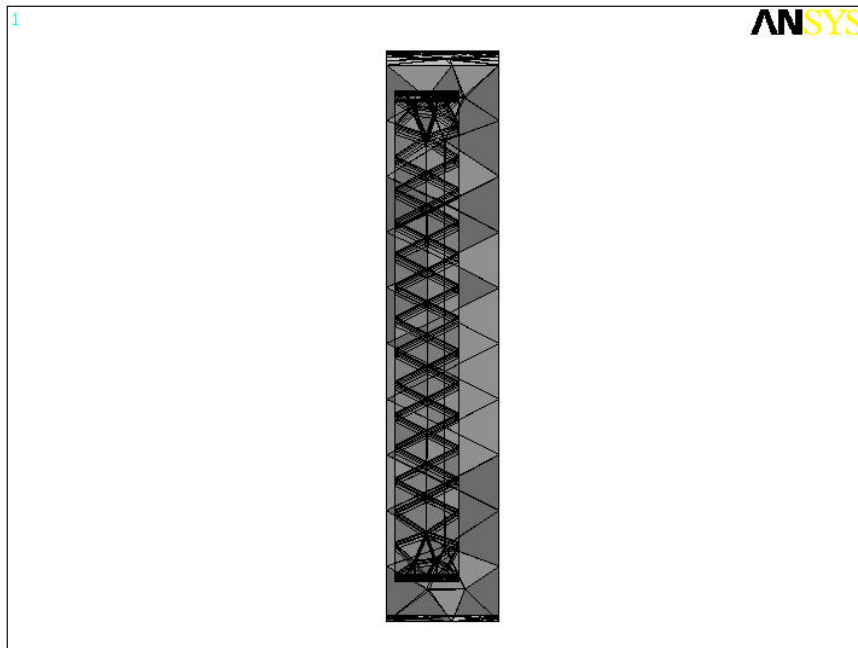


Figura 129. Vista lateral del mallado del aire. Se puede observar en el interior el espacio libre ocupado por los conductores del devanado inductor.

6.5. CONDICIONES DE CONTORNO.

Se han aplicado al modelo las siguientes condiciones de contorno:

- El flujo en todas las caras exteriores donde se aplica simetría es normal a la superficie ($\phi_r = 0$).
- El flujo en las caras exteriores donde no hay simetría es paralelo a la superficie ($\phi_N = 0$).

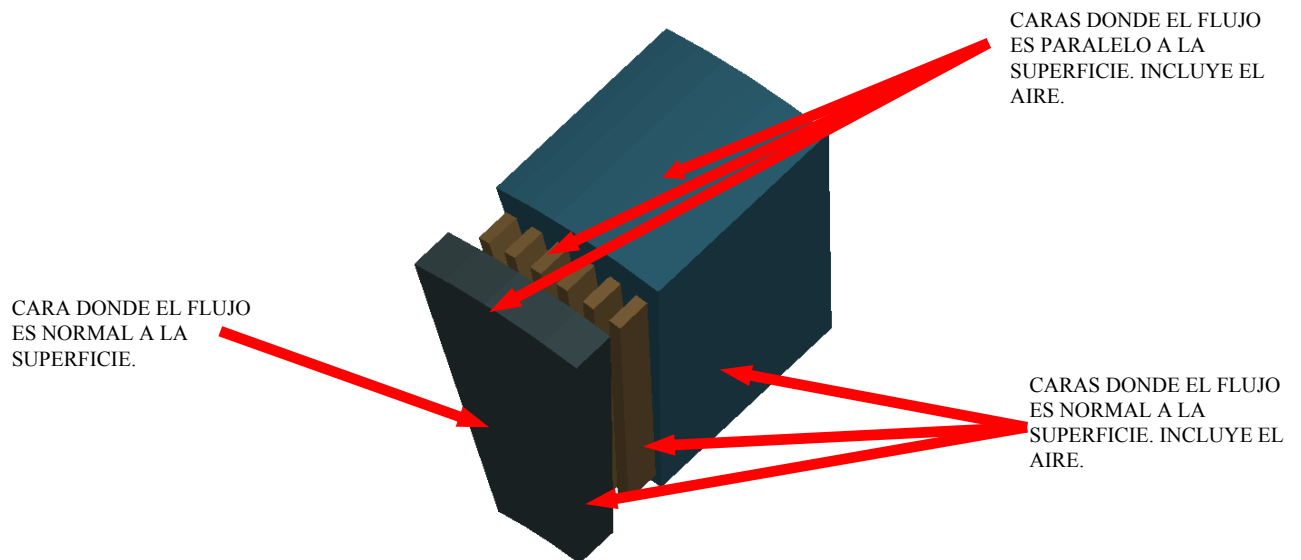


Figura 130. Condiciones de contorno aplicadas al modelo. Cara derecha y superior.

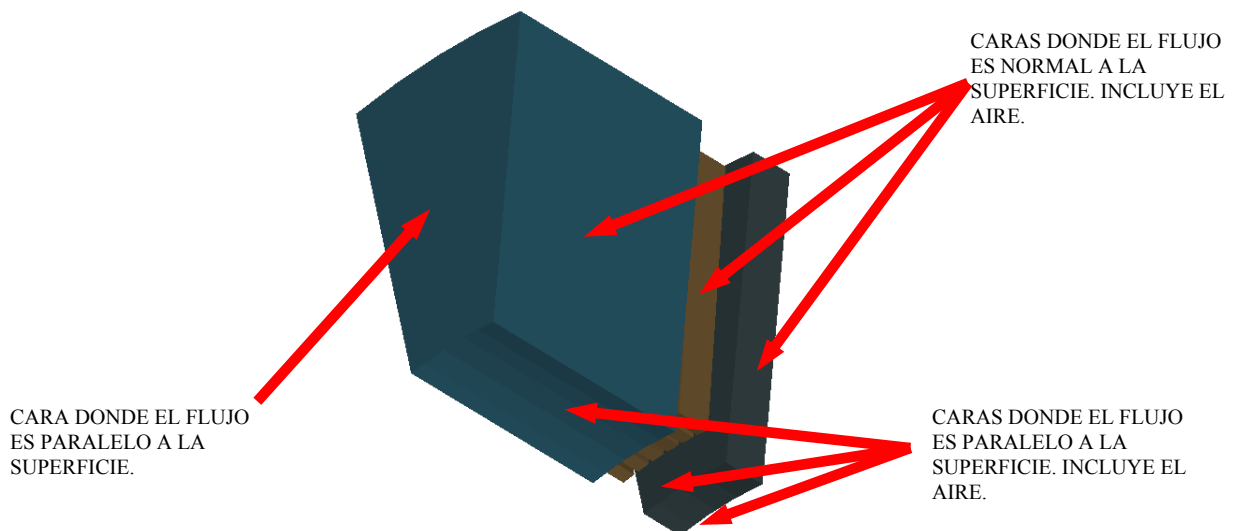


Figura 131. Condiciones de contorno aplicadas al modelo. Cara izquierda e inferior.

- Todos los materiales son lineales. No se ha tenido en cuenta la saturación del hierro.
- Los elementos móviles (rótora) no puede presentar discontinuidades en su sección transversal, es decir, no admite ranurados.
- Los nodos de los elementos de la cara inferior de los conductores tienen que estar acoplados para poder aplicar las corrientes de excitación. Se garantiza con ello que el potencial en esa cara es el mismo en todos los nodos. Es imprescindible para garantizar la ecuación de continuidad.

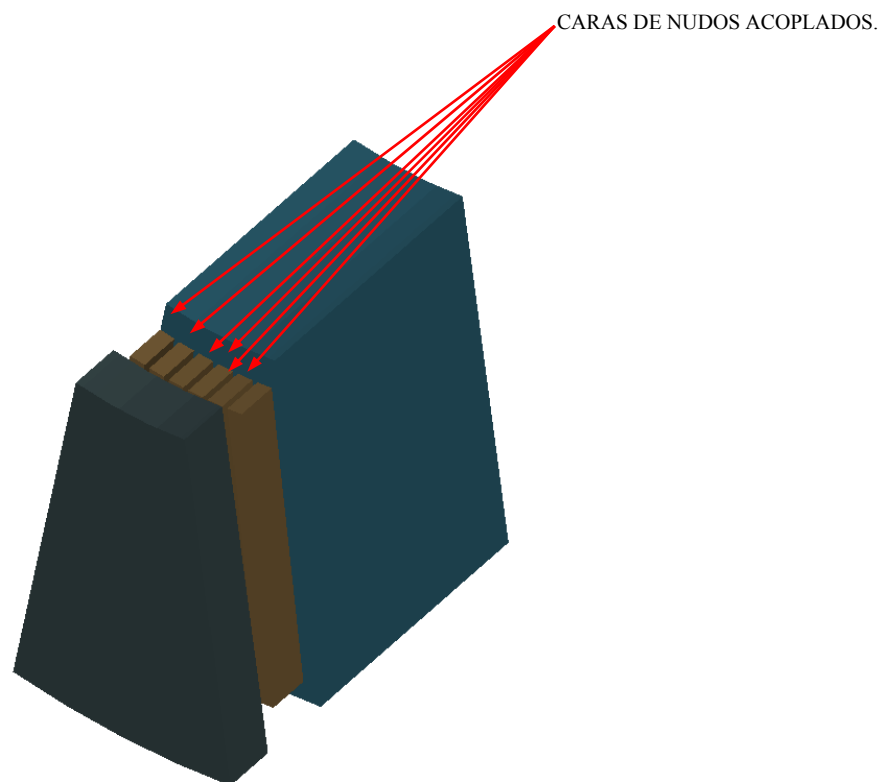


Figura 132. Condición de contorno de acoplamiento de las variables en los nodos de la cara inferior de los conductores.