

Metodología para el dimensionamiento de las barras tipo roebel para generadores síncronos de polos salientes

Desing methodology of roebel stator bars for salients poles synchronous generators

José L. Oslínger-Gutiérrez¹  Óscar R. Tudela-Rangel¹  José I. Caranguay-Mainguez¹ 

¹Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Resumen

En el presente documento se realiza un compendio metódico y general, principalmente, de las metodologías de cálculo de Juan Corrales Martín, Karl Vogt, Aleksandr Abramov, J. Pyrhönen, T. Jokinen, y V. Hrabovcová aplicadas al caso de estudio, el generador de la unidad de N° 1 de la central hidroeléctrica, CHE, de Salvajina, a partir de la información recopilada de la descripción del generador síncrono de polos salientes y el estudio general de su funcionamiento, específicamente del devanado del inducido con la metodología de (1), para establecer una metodología que permita dimensionar una barra tipo Roebel, y que servirá para el desarrollo de próximas investigaciones como aplicativo guía, para el estudio de otros generadores.

Abstract

In present paper a comparison between three methodological approaches for the implementation of the Roebel transposition method for the design of the stator bars of the winding in great synchronous machines is presented. The revised methodologies are obtained from three different authors: Juan Corrales Martín, Karl Vogt, Aleksandr Abramov, J. Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová. The methodologies were applied to the study case of a synchronous generator of 125MW located in the Salvajina Hydroelectric Plant and identified as Unit number 1, based on the information compiled from the description of the salient pole synchronous generator and the general study of its operation, specifically of the armature winding with methodology [1], to establish a methodology that allows sizing a Roebel-type bar that will serve for the development of future research as a guide for the study of other generators.

Keywords: sizing Roebel bar, Roebel transposition, Current displacement, Skin effect.

Palabras clave: dimensionamiento barra Roebel, Transposición Roebel, Desplazamiento de la corriente, Efecto piel.

¿Cómo citar?

Oslínger-Gutiérrez, J.L., Tudela-Rangel, O. R., Caranguay-Mainguez, J.I. Metodología para el dimensionamiento de las barras tipo roebel para generadores síncronos de polos salientes. Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(2)e-20513320

<https://doi.org/10.25100/iyv.26i2.13320>

Recibido: 1-11-23
Aceptado: 20-04-24

Correspondence:

jose.caranguay@correounivalle.edu.co

Este trabajo está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No comercial-Compartir-like4.0.



Conflicto de intereses:
ninguno declarado

OPEN  ACCESS

¿Por qué se llevó a cabo?

El estudio se realizó para proponer una metodología para el dimensionamiento de barras Roebel en generadores síncronos de polos salientes. Esta metodología se desarrolló comparando los enfoques propuestos por tres autores diferentes: Juan Corrales Martín, Karl Vogt y Aleksandr Abramov.

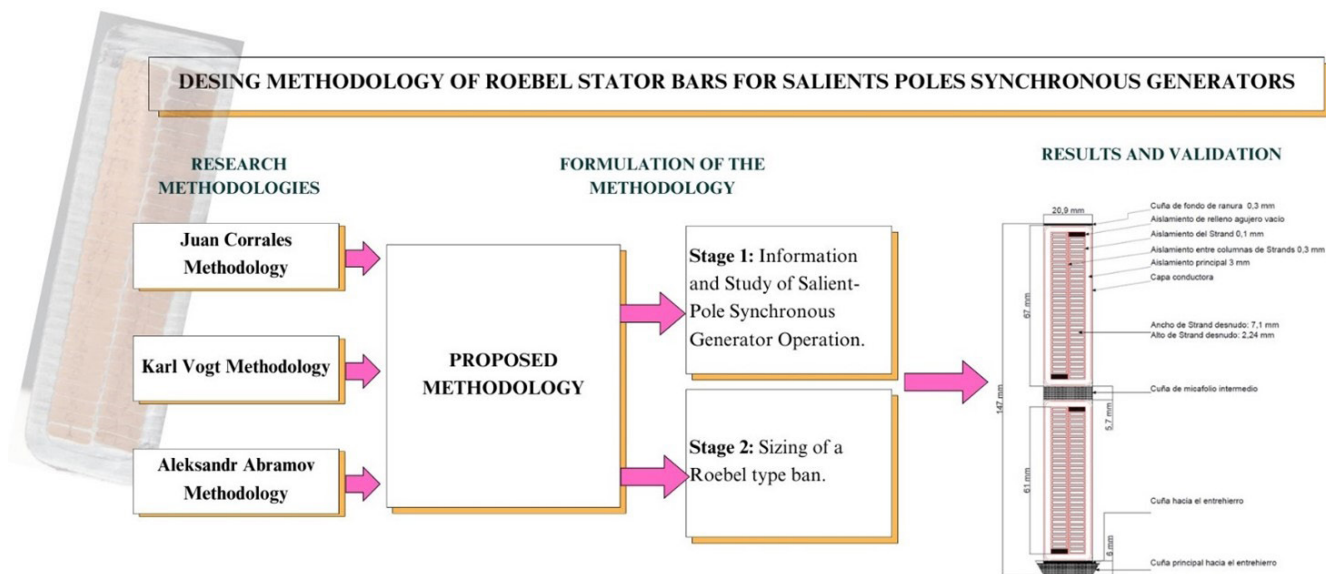
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Entre los resultados más relevantes se encuentra la comparación de las metodologías propuestas por Juan Corrales Martín, Karl Vogt y Aleksandr Abramov. La metodología propuesta exhibió márgenes de error mínimos y se aplicó con éxito a un caso de estudio del mundo real, la barra del estator del generador de 125MW en la unidad de generación de energía número 1 de la Central Hidroeléctrica Salvajina (SHEPP).

¿Qué aportan estos resultados?

Estos resultados proporcionan una metodología clara y estructurada para calcular el tamaño de las barras Roebel. Esta metodología ofrece un enfoque práctico y detallado que se puede aplicar en el diseño de generadores síncronos a gran escala.

Graphical Abstract



Introducción

En los inicios de la generación en A.C. los devanados del estator de los primeros generadores estaban provistos de barras de cobre sólido y a pesar de aumentar la sección transversal de cobre, no se pudo aumentar la corriente en la misma medida debido a los campos magnéticos de dispersión que producían corrientes parásitas gracias al desplazamiento de la densidad de corrientes en la barra, de modo que la sección transversal de cobre no fue utilizada por toda la corriente perteneciente a un conductor, de esta manera, si se deseaba aumentar el rendimiento se tenía que usar desproporcionadamente más material y, sin embargo, estas máquinas a menudo se calentaban demasiado, por lo que apenas era posible construir generadores con más de 10 a 20 MW. Las diferentes alternativas que pretendían dar solución a estos problemas no fueron suficientes, sino hasta 1912 donde Ludwig Roebel (1878-1934) con su invento de la trasposición de los subconductores [2], fue posible la construcción de grandes motores eléctricos y generadores, cuyo rango de potencia supera los 75 MW, con algunas excepciones, dependiendo del criterio del diseñador. Este tipo configuración de devanado del inducido se denominada barras tipo Roebel, en donde los subconductores, hilos o platinas se trasponen en la parte de la ranura, es decir en la parte activa de la bobina en múltiplos de 180° y se sueldan en los terminales de la bobina, distribución que permite reducir las pérdidas adicionales en el estator, fundamental para el correcto funcionamiento de una máquina, puesto que el hecho de no mitigar el desplazamiento de la corriente trae como consecuencia una menor eficiencia y un sobrecalentamiento del devanado del estator, y por tanto presentará daños en el aislamiento que reducen la vida útil de la máquina, sin mencionar las grandes pérdidas económicas que consigo trae este fenómeno.

Metodología

Trasposición roebel

Al circular corriente AC por los conductores del devanado del estator se establece un campo magnético que encierra los conductores y cruza la ranura, este a su vez produce una densidad de flujo que enlaza la ranura aumentando desde 0 en la parte inferior de la ranura hasta un valor máximo de densidad de flujo magnético en la parte superior de la ranura, dado que esta densidad crea un flujo variable en el tiempo que produce una f.e.m que se opone por ley de Lenz a la circulación de la corriente provocando que dicha corriente y por ende densidad de corriente se desplace a las orillas del conductor, este fenómeno se denomina efecto piel o efecto skin, que consiste principalmente en la concentración de corriente en las zonas de mínima autoinducción, es decir, en las zonas exteriores del flujo debido a que en algunas secciones existe mayor incidencia de flujos variables creados por la misma corriente, induciendo f.e.m que hace que la corriente no se distribuya de manera uniforme en la superficie del conductor, desaprovechando su área efectiva, lo que genera pérdidas adicionales en el cobre, dichas pérdidas se pueden separar en pérdidas por corrientes parásitas y en pérdidas por corrientes circulantes [3]. Así pues, el desplazamiento de la corriente es un caso particular del efecto piel, que depende de la disposición del circuito seguido por el flujo autoinductivo, ahora bien, si el conductor está alojado en una ranura del estator las distribuciones de corriente son totalmente diferentes debido al material ferromagnético que lo rodea, en este caso habrá una mayor concentración de campo magnético en la parte de arriba de la ranura, de ahí que, por efecto piel la corriente se desplace hacia la parte superior del conductor debido a

que hay una mayor f.e.m autoinducida que va a tratar que no circule corriente en la parte inferior del conductor, razón por la cual, el campo magnético en dicha zona donde el flujo enlaza parte del núcleo ferromagnético es despreciable, quedando la contribución de campo magnético de la parte superior del conductor como se muestra en la figura 1, por consiguiente, la concentración de corriente en una barra sin transposición no es uniforme e incrementa conforme lo hace la altura de la ranura.

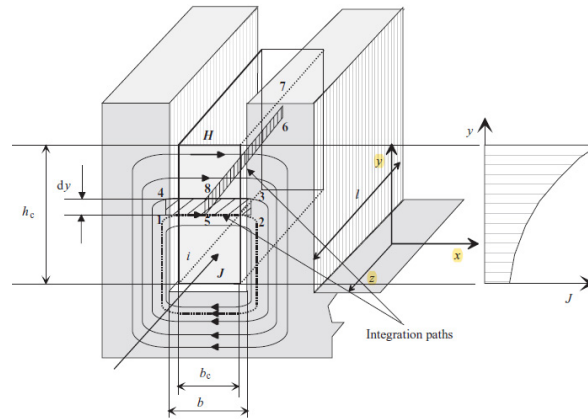


Figura 1. Efecto de desplazamiento de corriente en un conductor. Fuente: [4].

Ahora, como se mencionó anteriormente el flujo de fuga que enlaza la ranura induce en los conductores una f.e.m que es más grande en la parte superior del conductor que en la parte inferior, la diferencia de potencial entre la parte superior e inferior hace que fluyan corrientes de Foucault o también llamadas corrientes de parasitas, así pues, en un conductor macizo, habrá una gran diferencia en el flujo de fuga a través de la ranura de arriba a abajo y, por lo tanto, una gran diferencia de potencial que resultará en una gran corriente de Foucault, ahora bien si el conductor se subdivide en subconductores asilados entre sí como se muestra en la figura 2, entonces la diferencia en el flujo de fuga que enlaza la ranura de arriba a abajo de cada subconductor será menor, por lo tanto, una diferencia de potencial menor resultará en pequeñas corrientes de Foucault, generalmente, a medida que aumenta el número de subconductores verticales disminuirá así las pérdidas totales por cobre.

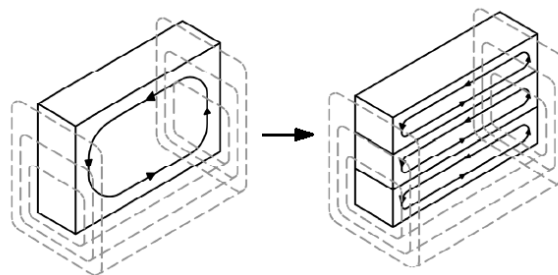


Figura 2. Efecto de laminar en profundidad el conductor del estator. Fuente: [3].

Ahora bien, si el conductor está compuesto por varios hilos asilados entre sí, los extremos de los hilos se sueldan, y dado que existe una diferencia de potencial entre

estos subconductores debido a la densidad de flujo magnético de la enlaza la ranura, las corrientes circulantes fluirán dentro de la bobina, es decir se deben a diferencias de f.e.m autoinducidas producidas por la distribución desigual del campo dentro de la ranura, provocando así pérdidas adicionales, y por consiguiente, reduciendo la eficiencia de la máquina y calentando el devanado.

La distribución de la corriente no uniforme dado por el efecto autoinductivo que la corriente del mismo conductor produce, se debe también a la acción inductora de otros conductores siempre que el campo debido a estos atraviese el conductor en cuestión, un ejemplo de las distribuciones de corriente de dos barras superpuestas se muestran en la figura 3, en esta simulación de COMSOL Multiphysics 2D de estado estacionario, con una calidad de mallado de 0.89 para un número de elementos de 9346, se puede observar que la concentración de corriente en una barra sin transposición es no uniforme e incrementa con la altura, el efecto que se observa en la base de la barra superior o Top obedece a la presencia de los enlazamientos de flujo de dispersión que es producido por la concentración de corriente de la barra inferior o bottom, además de las llamadas corrientes compensadoras que existen por el desigual flujo de dispersión producido por la barras inferior y superior, siempre y cuando vayan unidos paralelamente, por puntos que se encuentran fuera de estas. Las corrientes compensadoras no se cierran exclusivamente dentro del conductor, sino que, además, se prolongan a través de las cabezas de bobina, cuya resistencia se incorpora para reducir las corrientes compensadoras.

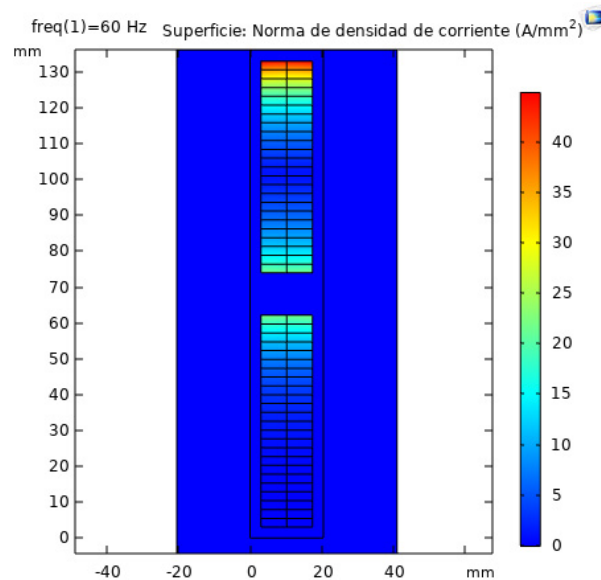


Figura 3. Barra sin transposición. Fuente: [5]

Pese a la división del conductor en subconductores la distribución de las densidades de corriente no es uniforme, puesto que el flujo se cierra asimétricamente dirigiéndose a la base de los dientes, lo que indica que los conductores que se encuentran en el fondo de la ranura tienen mayor reactancia inductiva que los que se encuentran en la parte superior de la ranura, haciendo que la corriente se concentre en la parte superior de la ranura; visto que no hay resultados que mitiguen las consecuencias que trae el desplazamiento de la corriente en la máquina, gracias al sistema Roebel, de construir la barra a partir de varios subconductores que están aislados entre sí y que están entrelazados, los efectos

de los campos magnéticos dispersos en la barra se equilibran, todos los subconductores paralelos inducen las mismas fuerzas electromotrices y toda la sección transversal de cobre se usa casi de manera uniforme, es debido a que se produce un cambio constante entre los subconductores, el efecto piel se minimiza notablemente, de manera que se eliminan las sumas de los flujos parciales de los caminos de integración que provocan las corrientes de Foucault, y al obtener en promedio las mismas inducciones de f.e.m se eliminan las corrientes circulantes, no obstante, el efecto piel se sigue presentando en los subconductores, pero en menor medida, el cual se puede disminuir empleando subconductores con un área de sección transversal tan pequeña como sea posible, modificaciones que están sujetas a un cálculo de dimensionamiento. Estos subconductores deben generalmente soldarse al final de cada ranura, en la cabeza de bobina o parte final, anterior y posterior. Hay casos en que deben extenderse a través de todas o al menos varias ranuras antes de que puedan conectarse en paralelo, ya que de lo contrario también se generarían corrientes internas.

El sistema Roebel o trasposición Roebel, se emplea en grandes generadores de hasta 2200 MW, cada bobina está conformada por delgados hilos o láminas de cobre aisladas entre sí en dos columnas [6], las cuales se trenzan y se encintan con una capa de aislante, por lo general este tipo de devanado consta de una sola vuelta efectiva por bobina, es decir, está formado por semibobinas que se insertan la mitad de una bobina en una ranura y la otra mitad en otra ranura, lo cual es mucho más fácil que colocar ambos lados de la bobina en dos ranuras diferentes al mismo tiempo, una vez insertadas las semibobinas, se conectan los extremos y se completa la bobina. Los subconductores se trasponen en la parte de la ranura, es decir en la parte activa de la bobina en múltiplos de 180° [7], esta configuración del devanado es de las más efectivas para limitar el efecto piel, que ocasiona el desplazamiento de la corriente y por consiguiente reducir las pérdidas adicionales en el cobre que traen como consecuencia una menor eficiencia, y sobre todo un sobrecalentamiento del devanado del estator, y por tanto presentará daños en el aislamiento que reducen la vida útil de la máquina, sin mencionar las grandes pérdidas económicas que trae consigo este fenómeno. En la figura 4 se muestra la trasposición Roebel que se realiza solo en el área ranurada, en este caso una trasposición de 360° los subconductores deben estar en todas las posiciones posibles dentro de la misma barra, es decir, un subconductor que se encuentra inicialmente en la posición superior izquierda, se desplaza a la siguiente posición inferior izquierda y continúa así hasta que alcanza su posición original, de esta manera la tensión inducida total en este hilo será la misma que la de los demás hilos que fueron transpuestos y las densidades de corriente serán aproximadamente iguales.

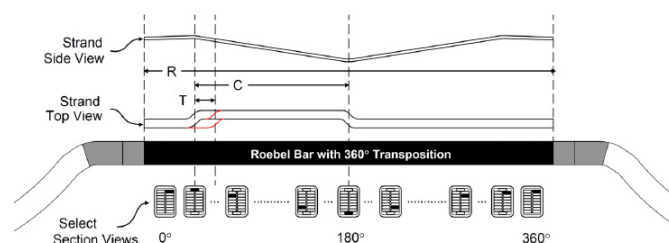


Figura 4. Posición del subconductor a lo largo de la trasposición Roebel a 180° y 360°
Fuente: [3].

Al no tener diferencias de potencial se podrán conectar los extremos de estos hilos y no se producirán corrientes circulantes, existen diferentes maneras para llevar a cabo la transposición de subconductores, por lo general es hacer traspasar los subconductores de derecha a izquierda y de arriba abajo.

Metodologías de investigación

Una vez recopilada la información, parámetros y procedimientos de las bibliografías consultadas, se aplica los diferentes procedimientos que permiten el dimensionamiento de una barra tipo Roebel, la comparación de los resultados obtenidos en cada uno de ellos con la barra real provista por planos, tienen un margen de error aceptable, según [8] para el diseño de grandes máquinas síncronas los errores de cálculo deben estar dentro del 10%, tabla 6, posteriormente, se realiza un compendio de las metodologías aplicadas para establecer una metodología que permita dimensionar una barra tipo Roebel que se pueda generalizar a otros generadores de forma más clara y metódica, así pues, se especifica la secuencia de las metodologías investigadas y propuesta de la siguiente manera:

Nota: la nomenclatura de las metodologías es distinta a la que se muestra en el ítem I, por tanto, se expresa la secuencia con el nombre de los parámetros.

A. Metodología Juan corrales Martin

Se detallarán los pasos iniciales con el método de [9] página, 162 – 167 de [10], como guía para seguir los otros autores.

1. Recopilar la información mínima requerida, es decir, los datos de partida que se exponen en la tabla 1.

Tabla 1. Datos iniciales

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente por rama	I_f	2615	A
Conductores por ranura	Z_n	2	-
Número de ranuras	n	300	-
Diámetro del entrehierro	D	7130	mm
Velocidad de giro	N	180	r/m
Longitud bruta del hierro	L_h	1270	mm

2. Calcular densidad de corriente del conductor.

Para el dimensionamiento del conductor, inicialmente es necesario determinar la sección o área del conductor, Ec. (4), que depende de la densidad de corriente admisible Δ , para la cual se tiene que:

$$\Delta = \frac{q\Delta}{q} \quad (1)$$

Donde,

q : carga lineal específica.

$q\Delta$: variación $q\Delta$ admisible relacionada con el calentamiento de inducido.

Para determinar la densidad de corriente es necesario los siguientes parámetros:

2.1. Calcular la velocidad periférica de la máquina.

Ahora, para determinar la densidad de corriente admisible es necesario encontrar la variación de $q\Delta/\Delta\theta$ admisible en la superficie de las cabezas de bobina, que se determina con la velocidad periférica v con la siguiente ecuación, donde N es la velocidad de giro de la máquina en [r/m]:

$$v = \frac{\pi DN}{60} \quad (2)$$

2.2. Encontrar la variación de $\frac{q\Delta}{\Delta\theta}$ admisible según [9].

Debido a que la máquina bajo estudio pertenece a una central hidroeléctrica es de baja velocidad, por tanto, para una $v = 66,935 \text{ m/s}$ se define la variación de $\frac{q\Delta}{\Delta\theta}$ admisible según [10], que presenta los valores de $q\Delta$ que puede adoptarse por cada grado centígrado de elevación de temperatura en las cabezas por bobinas, de esta manera:

$$\frac{q \cdot \Delta}{\Delta\theta} = 53 \frac{\text{Ac}}{\text{cm}} \frac{\text{A}}{\text{mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

2.3. Encontrar la variación $q\Delta$ admisible según [9].

La densidad de corriente, a su vez está relacionada con el calentamiento de inducido, para ello la variación estimada de temperatura admisible en las cabezas de bobina teniendo en cuenta que el devanado estático en funcionamiento está a $100 \text{ } ^\circ\text{C}$, con un aislamiento clase F en donde la temperatura máxima de funcionamiento admisible es de $155 \text{ } ^\circ\text{C}$, de esta manera para el incremento de la temperatura admisible en las cabezas de bobina $\Delta\theta = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$, se tiene que:

$$q\Delta \text{ admisible} = \left(\frac{q\Delta}{\Delta\theta}\right) \Delta\theta \quad (3)$$

2.4. Calcular la carga lineal específica.

Así mismo es necesario el cálculo de la carga lineal específica q que se calcula con la siguiente ecuación:

$$q = \frac{n Z_n I_f}{\pi D} \quad (4)$$

3. Calcular la sección transversal del conductor por fase.

Ahora bien, ya determinado los parámetros anteriores se calcula la sección del conductor por fase S_f :

$$S_f = \frac{I_f}{\Delta} \quad (5)$$

Donde,

S_f : sección de conductor por fase [mm²].

I_f , corriente por fase [A].

Δ , densidad de corriente admisible [A/mm²].

4. Determinar las dimensiones principales de la barra.

Se determinan las dimensiones principales de la barra que se muestran de manera general en la Figura 5.

4.1. Calcular el ancho de la ranura.

El ancho de la ranura α se determina como la diferencia entre el paso del diente τ_δ y el grueso de diente t_o , así pues, se procede a calcular dichos parámetros:

$$\alpha = \tau_\delta - t_o \quad (6)$$

Donde,

τ_δ : paso máximo de diente.

t_o : grueso máximo del diente.

4.2. Definir el aislamiento principal.

$$\text{Grueso del manguito} = 0,5 + \frac{U}{3,3} \quad (7)$$

Donde,

U: es la tensión nominal de máquina.

Grueso del manguito o también llamada cuña de micafolio intermedio, adoptado: 3mm

Nota: Las diferentes metodologías para el dimensionamiento de la ranura no determinan en detalle la cuña de micafolio intermedio que es la cuña aislante de separación entre las dos barras cuando el devanado es de doble capa, puesto que son parámetros de fabricación confidenciales que tiene el fabricante.

4.3. Calcular el ancho de la barra, solo cobre.

$$\text{Ancho total del cobre} = a - 2 \cdot t \quad (8)$$

Donde,

a : ancho total del cobre en la ranura.

t : aislamiento principal.

4.4. Calcular el ancho de cada subconductor.

Para determinar el ancho del subconductor a_1 es necesario definir el ancho del tejido intermedio, el cual según la industria se asume entre 0.3mm y 0.6mm., de esta manera se tiene:

$$a_1 = \frac{\text{Ancho total del cobre} - \text{ancho intermedio}}{2} \quad (9)$$

4.5. Definir el aislamiento del subconductor.

La altura de aislantes entre hilos desnudos depende del aislante del hilo desnudo que es determinado por el fabricante, por lo general es de $0,2 \text{ mm}$.

4.6. Definir la altura de la cuña de micafolio intermedio.

Cuña de micafolio intermedio adoptado: $5,7 \text{ mm}$

4.7. Calcular la altura del subconductor.

Se determina con el criterio de altura mínima d_L de densidad de corriente constante y el número entero de hilos en la profundidad de una vuelta.

$$d_L = \frac{s_f}{n_3 \cdot a_1} \quad (10)$$

4.8. Calcular la altura del conductor.

La altura de los conductores de una capa h_{ce} :

$$h_{ce} = \left(\frac{n_3}{2} + 1\right) \cdot dL \quad (11)$$

4.9. Calcular la altura de la ranura.

La altura total de la ranura h_t :

$$h_t = 2 \cdot h_{ci} + \text{micafolio} + 4 \cdot \text{manguito} + \text{cuña} + \text{pieza de lleno} + \text{tira de protección} \quad (12)$$

4.10. Definir el aislamiento de relleno de agujero vacío, teniendo en cuenta sistema de convencional de aislamiento.

4.11. Definir la altura de la cuña principal hacia el entrehierro.

4.12. Definir la cuña de fondo de ranura.

5. Se definen dimensiones adicionales y se reajustan las dimensiones principales para el modelo final.

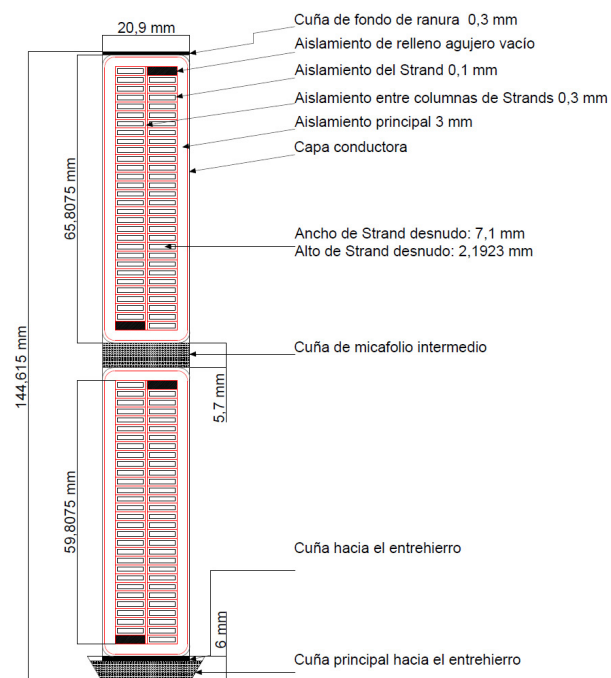


Figura 5. Dimensiones del método Juan Corrales. Fuente: [5]

B. Metodología Karl Vogt

Se detallarán los pasos iniciales con el método de [11], página, 168 – 174 de [10], como guía.

1. Recopilar la información mínima requerida, es decir los datos de partida que se exponen en la tabla 2

Tabla 2. Datos iniciales

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente por rama	I_{zw}	2615	A
Conductores por ranura	Z_n	2	-
Número de ranuras	N	300	-
Diámetro del entrehierro	D	7130	mm
Longitud bruta del hierro	L_i	1270	mm

2. Seleccionar la densidad de corriente del conductor, según [11], Valores orientativos de densidad de corrientes.
3. Calcular la sección transversal del conductor por fase.

Para determinar la sección transversal del conductor es necesario los siguientes parámetros:

$$A_1 = \frac{i_{zw}}{S_n} \quad (13)$$

- 1.1. Calcular la carga periférica de la máquina o carga lineal.

$$A = \frac{N \cdot i_{zw}}{D\pi} \quad (14)$$

- 1.2. Determinar la corriente por rama.
- 1.3. Tomar la densidad de corriente del ítem 2 de la presente metodología.
4. Determinar las dimensiones principales de la barra.

Se determinan las dimensiones principales de la barra que se muestran de manera general en la Figura 6.

- 1.1. Calcular el ancho de la ranura, el procedimiento es el mismo según el ítem 4.1 de la metodología de Juan Corrales Martin.

$$b_n = \tau_n - b_z \quad (15)$$

- 1.2. Determinar la altura de la ranura.
- 1.3. Determinar la altura del conductor.

Los parámetros del ítem 4.2, 4.3 de la presente metodología son datos iniciales de aproximación.

- 1.4. Calcular el número de pisos del conductor.

$$n_t = \left(\frac{h_{gr}}{1,5} \right)^2 \quad (16)$$

- 1.5. Calcular la altura del subconductor.

$$h_t \approx \frac{1,5cm}{\sqrt{n_t}} \quad (17)$$

- 1.6. Calcular la sección transversal del subconductor.

$$A_{1t} = b_t \cdot h_t \quad (18)$$

- 1.7. Calcular el número de subconductores del conductor.

$$\#strands = \frac{A_1}{A_{1t}} \quad (19)$$

- 1.8. Definir el aislamiento principal.
- 1.9. Definir el aislamiento entre columnas de subconductores.

- 1.10. Definir el aislamiento de los subconductores.
- 1.11. Definir la altura de la cuña de micafolio intermedio.
- 1.12. Definir del aislamiento de relleno de agujero vacío, teniendo en cuenta sistema de convencional de aislamiento.
- 1.13. Definir la altura de la cuña principal hacia el entrehierro.
- 1.14. Definir la altura de la cuña de fondo de ranura.
- 1.15. Calcular la altura total de la ranura

$$\begin{aligned} \text{Altura Ranura} = & 2 \cdot h_{ci} + \text{micafolio} + 4 \cdot \text{manguito} + \text{cuña} \\ & + \text{pieza de lleno} + \text{tira de protección} \end{aligned} \quad (20)$$

5. Se definen dimensiones adicionales y se reajustan las dimensiones principales para el modelo final.

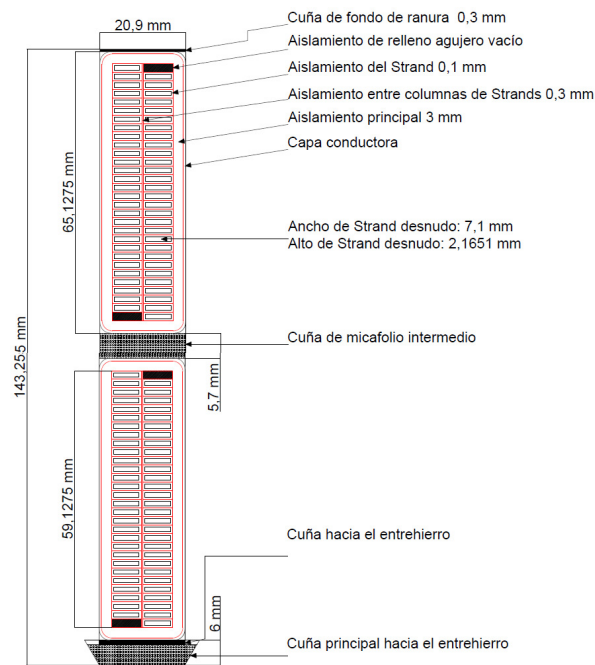


Figura 6. Dimensiones del método de Karl Vogt. Fuente: [5]

C. Metodología Aleksandr Abramov

Se detallarán los pasos iniciales con el método de [12], página, 174 – 181 de [10], como guía.

1. Recopilar la información mínima requerida, es decir los datos de partida que se exponen en la tabla 3.

Tabla 3. Datos iniciales

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente por fase	I_n	5230	A
Ramas paralelas	a_1	2	-
Número de ranuras	Z_1	300	-
Número de conductores en la ranura	u_{n1}	2	-
Número de ranuras por polo y fase	q_1	2,5	-
Diámetro del entrehierro	D	7130	mm
Longitud bruta del hierro	L_i	1270	mm
Pares de polos	p	20	-
Resistividad eléctrica específica	ρ_1	$2,89 \cdot 10^{-8}$	Ωm
Coefficiente de aumento de pérdidas	k_r	1,32	-
Inducción máxima senoidal en el entrehierro	$\hat{B}_{\delta H}$	1,15	T
Inducción máxima senoidal en los dientes en vacío	\hat{B}'_{z1}	1,96	T
Factor relativo de forma	K_M	0,97	-

2. Calcular la densidad de corriente del conductor

$$\Delta_1 = \frac{\Delta_1 A}{A} \quad (21)$$

Para determinar la densidad de corriente es necesario los siguientes parámetros:

2.1. Calcular la carga lineal.

$$A = \frac{6w_1 I_n}{\pi D} \quad (22)$$

2.2. Encontrar la variación de $\Delta_1 A$ según [12].

3. Calcular la sección transversal del conductor efectivo.

$$s_1 = \frac{I_n}{a_1 \Delta_1} \quad (23)$$

4. Determinar las dimensiones principales de la barra.

Se determinan las dimensiones principales de la barra que se muestran de manera general en la figura 7.

4.1. Calcular el ancho de la ranura, el procedimiento es el mismo según el ítem 4.1 de la metodología de Juan Corrales Martín.

$$b_n = t_{z1} - b'_z \quad (24)$$

4.2. Calcular el ancho del conductor, solo cobre.

$$b_0 = b_n - 2\delta_H - \Delta b \quad (25)$$

4.2.1. Definir el aislamiento principal, según [12].

4.2.2. Definir la tolerancia por de punzonado y ensamblaje del núcleo a lo largo del ancho de la ranura, según [12].

4.3. Calcular el ancho del subconductor, solo cobre.

$$b_\theta = b_n - \Delta_n = \frac{b_0}{n_\theta} - \Delta_n \quad (26)$$

4.3.1. Determinar el grosor del aislamiento del subconductor, según la tabla A1.3 de [12].

4.4. Seleccionar la altura del subconductor, según la tabla de A1.1 [12].

4.5. Definir el ancho del subconductor, según la tabla A1.1 [12].

4.6. Determinar la sección transversal del subconductor, según la tabla de A1.1 [12].

4.7. Recalcular el ancho de la ranura.

$$b_n = 2b_\theta + 2\Delta_n + 2\delta + \Delta b \quad (27)$$

4.8. Calcular el número de subconductores de un conductor.

$$c_\theta = \frac{s_1}{s_\theta} \quad (28)$$

4.9. Recalcular la sección transversal del conductor.

4.10. Recalcular la densidad de corriente del conductor.

4.11. Calcular la altura del subconductor incluido su aislamiento.

$$a_H = a_\theta + \Delta_n \quad (29)$$

4.12.

4.13. Calcular el ancho del subconductor incluido su aislamiento

$$b_H = b_\partial + \Delta_u \quad (30)$$

4.14. Calcular la altura total de los subconductores elementales aislados de una barra.

$$h_0 = a_H \left(\frac{c_\partial}{2} + 1 \right) \quad (31)$$

4.15. Calcular la altura de la cuña principal hacia el entrehierro.

$$h_{k\pi} = 0,3 \cdot b_n \quad (32)$$

4.16. Calcular la altura total de la ranura.

$$h_n = h_z = 2h_0 + \delta_h + \Delta_h + h_{k\pi} \quad (33)$$

4.16.1. Definir la tolerancia por punzonado y ensamblaje del núcleo a lo largo de la altura de la ranura

4.16.2. Calcular la altura de la cuña principal hacia el entrehierro.

4.17. Definir el aislamiento entre columnas de subconductores.

4.18. Definir la altura de la cuña de micafolio intermedio.

4.19. Definir del aislamiento de relleno de agujero vacío, teniendo en cuenta sistema de convencional de aislamiento.

4.20. Definir la cuña de fondo de ranura.

5. Reajustar las dimensiones principales para el modelo final.

6. Determinar la temperatura promedio del aislamiento de la ranura.

$$\theta_n = \frac{\rho_1 A t_{z1} \Delta_1 \delta_H k_r}{2(h_n - h_{k\pi})\lambda} \quad (34)$$

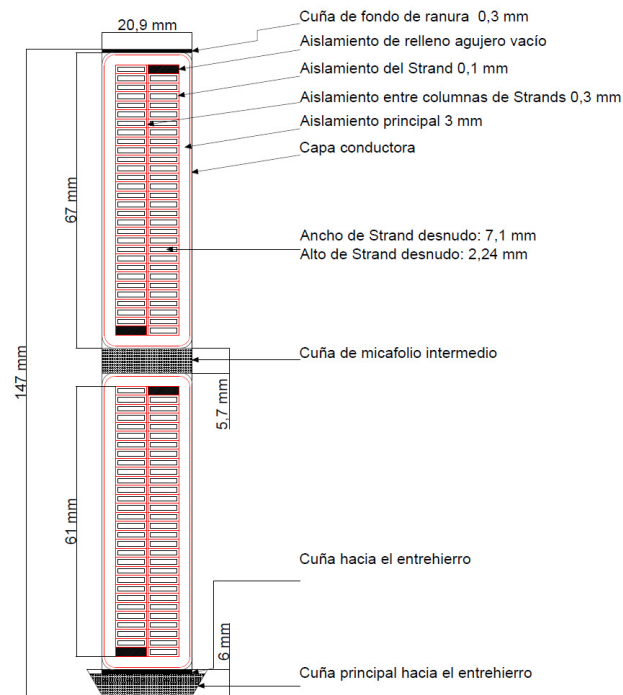


Figura 7. Dimensiones del método Abramov. Fuente: [5]

Formulación de la metodología

Para la formulación de la metodología se tiene en cuenta en su orden los cálculos y procedimientos desarrollados previamente para la máquina bajo estudio [5]. En [10] se muestra las dos etapas de aplicación de la metodología, respectivamente, esquemas que indican la secuencia en la que se debe implementar la metodología. A continuación, se especifican los pasos de las dos etapas mencionadas:

1. Recopilación de información y estudio del funcionamiento de la máquina bajo estudio.
 - 1.1. Recopilar la información necesaria de la máquina como dimensiones, características, pruebas realizadas.

Nota: La información recopilada se presenta en las tablas 1,2,3, información requerida para la implementación la metodología.

Nota: Cabe mencionar que, en máquinas de grandes potencias, como es el caso de estudio, no se puede parar su funcionamiento para realizar mediciones, puesto que esto supone la salida del generador de la red, desatención de la demanda de energía y por ende inestabilidad en el sistema eléctrico, razón por la cual, se debe extraer la información de los planos y las pruebas del generador.

Realizar el estudio de las f.m.m que genera el devanado del estator por la metodología de Piotr Wach [13] o Castro-Oslinger[14].

- 1.2. Calcular las reactancias de dispersión del devanado del estator con la metodología [1].
 - 1.2.1. Calcular la reactancia de dispersión de ranura.

- 1.2.2. Calcular la reactancia de dispersión diferencial.
- 1.2.3. Calcular la reactancia de dispersión de cabezas de bobina.
- 1.2.4. Calcular la reactancia de dispersión total.

Nota: Si se tiene la geometría y dimensiones de la máquina, se recomienda validar las densidades magnéticas con el MEF.

2. Dimensionamiento de una barra tipo Roebel.

- 2.1. Recopilar la información mínima requerida, es decir los datos de partida que se exponen en el ítem 1 de la metodología propuesta.
- 2.2. Calcular la densidad de corriente del conductor, como se muestra en el ítem 2 del apartado A.

Para determinar la densidad de corriente es necesario los siguiente es parámetros:

- 2.2.1. Calcular la velocidad periférica de la máquina.
- 2.2.2. Encontrar la variación de $\frac{q\Delta}{\Delta\theta}$ admisible.
- 2.2.3. Encontrar la variación $q\Delta$ admisible.
- 2.2.4. Calcular la carga lineal específica.
- 2.2.5. Comparar la densidad de corriente obtenida con el rango de valores que se proporciona el ítem 2 del apartado B.
- 2.3. Calcular la sección transversal del conductor, como se muestra en el ítem 3 del apartado C.
- 2.4. Determinar las dimensiones principales de la barra.

Se determinan las dimensiones principales en el siguiente orden:

- 2.4.1. Calcular el ancho de la ranura, como se realizó en el ítem 4.1 del del apartado A.
- 2.4.2. Calcular el ancho del conductor, solo cobre, como se realizó en el ítem 4.1 del apartado C.
 - 2.4.2.1. Definir el aislamiento principal, como se muestra en el ítem 4.2.1 del apartado C.
 - 2.4.2.2. Definir la tolerancia de punzonado y ensamblaje del núcleo a lo largo del ancho de la ranura.
- 2.4.3. Calcular el ancho del subconductor, solo cobre, como se realizó en el ítem 4.3 del apartado C.
 - 2.4.3.1. Definir el grosor del aislamiento del subconductor, como se muestra en el ítem 4.3.1 del apartado C.
- 2.4.4. Seleccionar la altura del subconductor, como se muestra en el ítem 4.4 del apartado C.
 - 2.4.4.1. Comparar este parámetro con el cálculo que se muestra en el ítem 4.5. del apartado B.

- 2.4.5. Definir el ancho del subconductor, como se muestra en el ítem 4.5 del apartado C.
- 2.4.6. Determinar la sección transversal del subconductor, como se muestra en el ítem 4.6 del apartado C.
 - 2.4.6.1. Comparar este parámetro con el cálculo que se muestra el ítem 4.6 del apartado B.
- 2.4.7. Recalcular el ancho de la ranura, como se realizó en el ítem 4.7 del apartado C.
- 2.4.8. Calcular el número de subconductores de un conductor, como se muestra en el ítem 4.8 del apartado C.
 - 2.4.8.1. Comparar con el cálculo del en el ítem 4.7 del apartado B.
- 2.4.9. Recalcular la sección transversal del conductor, como se muestra en el ítem 4.9 del apartado C.
- 2.4.10. Recalcular la densidad de corriente del conductor, como se muestra en el ítem 4.10 del apartado C.
- 2.4.11. Calcular la altura del subconductor incluido su aislamiento, como se muestra en el ítem 4.11 del apartado C.
- 2.4.12. Calcular el ancho del subconductor incluido su aislamiento, como se muestra en el ítem 4.12 del apartado C.
- 2.4.13. Calcular la altura total de los subconductores elementales aislados de una barra, como se muestra en el ítem 4.13 del apartado C.
- 2.4.14. Calcular la altura total de la ranura, como se muestra en el ítem 4.15 del apartado C.
 - 2.4.14.1. Definir la tolerancia por punzonado y ensamblaje del núcleo a lo largo de la altura de la ranura
 - 2.4.14.2. Calcular la altura de la cuña principal hacia el entrehierro, como se muestra en el ítem 4.14 del apartado C.
- 2.4.15. Definir el aislamiento entre columnas de subconductores, como se muestra en el ítem 4.16 del apartado C.
- 2.4.16. Definir la altura de la cuña de micafolio intermedio.
- 2.4.17. Definir el aislamiento de relleno de agujero vacío.
- 2.4.18. Definir la cuña de fondo de ranura.
- 2.5. Reajustar las dimensiones principales para el modelo final.
- 2.6. Determinar la temperatura promedio del aislamiento de la ranura, como se muestra en el ítem 6 del apartado C.
- 2.7. Calcular el factor incremento de resistencia, según la metodología [4].

Resultados

Validación de la metodología

Se valida la metodología con la unidad No. 1 de la central hidroeléctrica de Salvajina repotenciada cuya potencia es de 125MVA, para la que se realizaron los cálculos en los apartados anteriores, con los valores encontrados en la primera etapa, los cuales son contrastados como se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Validación de la etapa 1 de la metodología con la unidad No. 1 de la CHE de Salvajina.

Parámetro	Unidad	Valor calculado	Valor real	Error (%)
Reactancia de dispersión del estator	p.u	0,1567	0,16	2,01
Reactancia de reacción de inducido por el eje directo	p.u	0,9348	0,93	0,51
Reactancia de eje directo	p.u	1,0915	1,09	0,13
Reactancia de eje directo saturada	p.u	0,9019	0,95	5

De igual forma se contrastan los valores obtenidos de la etapa 2 con los valores que se suministraron de la unidad No. 1 de la central hidroeléctrica de Salvajina repotenciada, como se muestran en las tablas 5 y 6.

Tabla 5. Validación de la etapa 2 de la metodología con la unidad No. 1 de la CHE de Salvajina.

Parámetro	J. Corrales	K. Vogt	A. I. Abramov	Real (plano)
Ancho subconductor (desnudo) [mm]	7,10	7,10	7,10	-
Alto subconductor (desnudo) [mm]	2,19	2,17	2,24	-
Ancho de la ranura [mm]	20,90	20,90	20,90	20,50
Altura de la ranura [mm]	144,62	143,26	147,00	143,40
Altura de los subconductores aislados [mm]	59,81	59,13	61,00	59,10

Altura de la barra incluido aislamiento principal [mm]	65,81	65,13	67,00	65,20
Numero de subconductores por conductor	48	48	48	48
Carga lineal [10^3 A/m]	70,05	70,05	70,05	-
Densidad de corriente [A/m^2]	3,50	3,50	3,50	-
Sección transversal del conductor [m^2]	747,14	747,14	747,14	

Tabla 6. Errores relativos.

Error	J. Corrales	K. Vogt	A. I. Abramov
Ancho ranura	1,95%	1,95%	1,95%
Alto ranura	0,85%	0,10%	2,51%
Altura de los subconductores aislados	1,20%	0,05%	3,21%
Altura de la barra incluido ais. Principal	0,93%	0,11%	2,76%

Tabla 7. Factor de resistencia con transposición.

Metodología	Factor de Resistencia con transposición k_r
Metodología Juan Corrales	1,31
Metodología Karl Vogt	1,28
Metodología A. Abramov	1,32

Discusión de resultados

En este artículo, se presenta como alternativa a aplicar una novedosa metodología para el dimensionamiento de una barra de tipo Roebel para generadores síncronos con polos salientes. Se ha tomado como caso estudio la Unidad No. 1 de la Central Hidroeléctrica de Salvajina y como referencia base de comparación entre tres metodologías de cálculo y la metodología propuesta.

Para los cálculos del dimensionamiento de una barra tipo Roebel se aplicaron las metodologías de Juan Corrales Martín, Karl Vogt, Aleksandr Abramov con el fin de obtener tres modelos con resultados muy satisfactorios al modelo real del plano, tabla 5, donde el margen de error en las principales dimensiones es mínimo y son aceptados dentro del diseño de grandes máquinas sincrónicas de acuerdo con [8], aun cuando estas metodologías llegan a un modelo específico, los procedimientos para llegar a dicho prototipo son más minuciosos o prácticos para los diferentes métodos de cálculo, así pues, el modelo de Juan Corrales Martín se desarrolla de manera más práctica a diferencia de los otros que presentan más detalle de cálculo para llegar al modelo final, a continuación, se expresan las principales diferencias en tres puntos de evaluación, densidad de corriente, sección transversal del conductor y dimensiones principales en los modelos planteados.

En cuanto a la densidad de corriente del conductor, la metodología de Juan Corrales y Abramov realizan el cálculo para el cual es necesario previamente determinar parámetros como la variación de $\frac{q \Delta}{\Delta \theta}$ admisible, carga lineal específica, para el primero, y carga lineal, variación de $\Delta_1 A$, para el segundo, mientras que para la metodología de Karl Vogt este dato se selecciona según valores orientativos consignados en tablas experimentales que dependen de la máquina de estudio. Para la sección transversal del conductor hay una similitud en las diferentes metodologías de Juan Corrales, Karl Vogt, Aleksandr Abramov, puesto que parten desde ya con una densidad definida o calculada para posteriormente ejecutar el cálculo, el cual depende de este parámetro mencionado y del dato de corriente ya está dado.

En tanto a las dimensiones principales, las metodologías en mención inician cada procedimiento con el cálculo de las dimensiones de la ranura, en ese orden se determina el ancho de ranura, en donde se aplica el mismo procedimiento para las tres metodologías naturalmente como la diferencia entre el grueso del diente y el paso del diente, enseguida, en el caso de la metodología de Vogt se deriva el cálculo de la altura de la ranura con ayuda de la sección transversal del conductor, mientras que las otras metodologías determinan este parámetro después de definir el espesor de los aislamientos y dimensiones de los subconductores como lo hace Abramov; de esta manera para las dimensiones de los subconductores, en la metodología de Vogt el ancho es definido y se calcula la altura que permite determinar el número de subconductores, en cambio, para Juan Corrales se realiza el cálculo del ancho y altura del subconductor, ahora, para Abramov el cálculo de estas dimensiones se basan fundamentalmente en el estudio experimental de fabricantes que recopila y consignan su información en tablas de datos orientativos que sirven de guía para definir sus dimensiones conforme a la máquina de estudio después de haber hecho el cálculo analítico; acto seguido, en las metodologías de Karl Vogt y Abramov a diferencia de la Juan Corrales, el primero determina la sección transversal del subconductor y con ello el número de subconductores en el conductor, y para el segundo, ya definidas las dimensiones de los subconductores se calcula la sección transversal del subconductor que a su vez permite calcular el número de subconductores.

Para las dimensiones adicionales que permiten completar el modelo, los procedimientos de la metodología de Abramov ofrecen mayor especificación de los parámetros técnicos y de dimensionamiento, dado por el carácter experimental de máquinas y detalle en el cálculo, de esta manera mejoran el recálculo y reajuste de las demás dimensiones que facilitan complementar de forma más metódica y específica el modelo final.

Al ejecutar de manera secuencial las diferentes metodologías, se tuvieron que tomar decisiones en algunos parámetros que los procedimientos no los tenían en cuenta como la cuña de mica folio intermedio y la cuña principal hacia el entrehierro, para continuar con el dimensionamiento del modelo, así pues, con los estudios realizados de cada metodología, se concluye que la metodología de Abramov ofrece mayor detalle e integración de cálculo que las otras metodologías, con estas consideraciones se plantea una metodología que pretende tener mayor claridad y metodicidad en el orden de los procedimientos de cálculo para modelo final, cabe mencionar que esta metodología es una recopilación de las metodologías y bibliografía investigada.

De esta manera, los resultados de los métodos propuestos con sus respectivos errores en comparación con la barra real provista por planos, las principales diferencias son atribuidas a las diferencias culturales y principalmente al "know how" de cada fabricante, cabe mencionar que por razones de fabricación la altura de las platinas deberá estar por lo general en un rango de 1,6 a 3,2 mm, y la relación ancho-alto de la platina debe limitarse a un valor cercano a 4 mm [15], como se observa tablas 5 y 6, adicionalmente los bordes de la platina son de redondeados para evitar concentración de calor y por tanto sean aportes a las pérdidas de la máquina.

Conclusiones

Para la ejecución del propósito de este artículo de establecer una metodología para el dimensionamiento de una barra tipo Roebel para generadores síncronos de polos salientes, caso de estudio la Unidad N°1 de la CHE de Salvajina, a la cual se le cambió el devanado estático para su repotenciación, es necesario el desarrollo de apartados, en donde se identifica los principales componentes que la conforman, descripción general de la máquina bajo estudio, principio de funcionamiento, estudio del devanado, del inducido donde se recomienda la metodología de [5], para su elaboración y donde también se determinaron los armónicos de FMM de reacción del inducido. En síntesis, este estudio permitió la verificación de parámetros electromagnéticos y la determinación de parámetros iniciales de las metodologías de investigación.

Ahora bien, con el estudio y caracterización electromagnética del devanado del inducido se debe recopilar la información requerida que permita realizar los cálculos para el dimensionamiento de una barra tipo Roebel, para lo cual, se plantearon los métodos propuestos por los principales investigadores de las escuelas rusa, alemana, española y finlandesa, las cuales se aplicaron al caso de estudio y se ejecutaron cada una con sus procedimientos de cálculo, así pues, entre las metodologías desarrolladas está la de Juan Corrales Martín, Karl Vogt, Aleksandr Abramov, metodologías que se llevaron a cabo para obtener tres modelos, de los cuales se lograron resultados satisfactorios, con sus respectivos parámetros de evaluación se compararon y se lograron márgenes de error que fueron mínimos según [8], que se pueden apreciar en la tabla 5 y tabla 6, adicionalmente, con la metodología de J. Pyrhönen [4] se realizó el cálculo del factor K_r como indicador del efecto de transposición de subconductores en las pérdidas en el cobre, como se muestra en [5], el cual según [16] debe ser inferior a 1.33, como así lo fue para los modelos obtenidos, tabla 7, finalmente, a partir de las diferentes metodologías propuestas, con sus especificaciones y limitaciones encontradas en cada una de ellas, se logró definir una metodología más apropiada para el dimensionamiento de una barra tipo Roebel.

Por último, al ejecutar cada metodología y definir una que integre la información de sus métodos y se complementen las restricciones en los procedimientos de cálculo para la obtención de un modelo final, se procedió teniendo en cuenta la finalidad de este artículo y el caso de estudio, a realizar un metodología general para compendiar de forma genérica y metódica todos los apartados de [5] en dos etapas que confluyen en una metodología guía que se presenta en este documento y que permite con mayor claridad afrontar un dimensionamiento de una barra tipo Roebel.

Nomenclatura

D. Metodología Juan corrales Martin

Δ :	Densidad de corriente del conductor
v :	Velocidad periférica de la máquina
q :	Carga lineal específica
S_f :	Sección transversal del conductor por fase
I_f :	Corriente del conductor por fase
D :	Diámetro del entrehierro
N :	Velocidad de giro
Z_n :	Conductores por ranura
a :	Ancho de la ranura
τ_δ :	Paso del diente
t_o :	Grueso de diente
a_1 :	Ancho de cada subconductor
d_L :	Altura del subconductor
n_3 :	Número de hilos en la profundidad de la ranura
h_{ce} :	Altura del conductor
h_t :	Altura de la ranura

B. Metodología Karl Vogt.

S_a :	Densidad de corriente del conductor
i_{zw} :	Corriente del conductor por fase
A :	Carga lineal específica
N :	Número de ranuras
D :	Diámetro del entrehierro
A_n :	Área de la sección transversal de la ranura.
A_1 :	Área de la sección transversal del cobre del conductor
z_n :	Conductores por ranura
b_n :	Ancho de la ranura
τ_n :	Paso del diente
b_z :	Grueso de diente
h_t :	Altura de un subconductor
n_t :	Número de subconductores en la profundidad de la ranura
A_{1t} :	Sección del subconductor
b_t :	Ancho del subconductor
h_{ci} :	Altura de los conductores de una capa

C. Metodología Aleksandr. I. Abramov.

Δ_1 :	Densidad de corriente del conductor
--------------	-------------------------------------

I_n :	Corriente del conductor por fase
a_1 :	Número de ramas paralelas
S_1 :	Sección transversal del conductor
A :	Carga lineal
D :	Diámetro del entrehierro
b_n :	Ancho de ranura
Z_1 :	Número de ranuras
t_{z1} :	Paso del diente
b'_z :	Grosor de diente
b_0 :	Ancho del conductor solo cobre
$2\delta_H$:	Espesor total del aislamiento conductor
Δb :	Tolerancia por inexactitud
b_θ :	Ancho de la platina
b_n :	Ancho del subconductor solo cobre
Δ_n :	Grosor del aislamiento en los dos lados de la platina
n_θ :	Número de conductores en la ranura
a_θ :	Altura del subconductor
s_θ :	Sección transversal del subconductor
c_θ :	Número de subconductores en el conductor
a_H :	Altura del subconductor con aislamiento
Δ_n :	Grosor aislamiento subconductor
b_H :	Ancho del subconductor con aislamiento
h_0 :	Altura total de los subconductores aislados de un conductor
$h_{k\pi}$:	Altura de la cuña principal hacia el entrehierro
h_n :	Altura total de la ranura
θ_n :	Temperatura promedio del aislamiento de la ranura
λ :	Conductividad térmica del aislamiento
k_r :	Factor de resistencia

Referencias

- [1] M. P. Kostenko and L. M. Piotrovski, *Máquinas Eléctricas II*, 1st ed. 1978.
- [2] M. L. Heilig, "United States Patent Office," *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 28, no. 2, pp. 131–134, 1994, doi: 10.1145/178951.178972.
- [3] M. Howell, "Beyond I²R-Additional copper losses in stator windings," vol. 1, pp. 2–5, 2019.
- [4] J. Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová, *Design of Rotating Electrical Machines*. 2008. doi: 10.1002/9780470740095.
- [5] J. I. Caranguay Mainguez, "Metodología para el Dimensionamiento de las Barras Tipo Roebel para Generadores Síncronos de Polos Salientes," 2022.
- [6] P. R. Fard, "Roebel Windings for Hydro Generators," *Chalmers*, vol. 1, p. 69, 2007.
- [7] K. Takahashi, M. Takahashi, and M. Sato, "Calculation method for strand current distributions in armature winding of a turbine generator," *Electrical Engineering in*



- Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi), vol. 143, no. 2, pp. 50–58, 2003, doi: 10.1002/eej.10131.
- [8] J. Walker Holmes, "Design, Manufacture and operation."
- [9] J. Corrales Martin, "Cálculo Industrial de Máquinas Eléctrica, Tomo II." 1976.
- [10] Ó. R. Tudela Rangel, "Aportes al Diseño de Barras Tipo Roebel para el Inducido de Generadores Caso generador de la Unidad N°1 de la Central hidroeléctrica de Salvajina," 2023, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [11] K. Vogt, "Máquinas eléctricas, Calculo de máquinas eléctricas rotativas," Casa editorial tecnológica, vol. 4, 1988.
- [12] Aleksandr. Abramov and I. Smolensk, "Design of Hydrogenerators and Synchronous Compensators." Escuela superior FSUE, Moscú.
- [13] P. Wach, "Algorithmic method of design and analysis of fractional-slot windings of AC machines," *Electrical Engineering*, vol. 81, no. 3, pp. 163–170, 1998, doi: 10.1007/BF01236235.
- [14] L. C. Castro Heredia and J. L. Oslínger Gutiérrez, "Metodología para el cálculo de armónicos de fuerza magnetomotriz y su relación con las componentes de secuencia de la fem de ranura," *Ingeniería y Universidad*, vol. 17, no. 2, pp. 339–354, 2013.
- [15] M. Javier. Lopera Estrada and L. M. Marrugo Castilla, "Primera Bobina Roebel Colombiana de Emergencia," *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., pp. 10–27, 2018.
- [16] I. Boldea, *The electric generators handbook*. 2006.