

## NUEVO MODELO DEL SISTEMA ANÓDICO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ELÉCTRICA EN LAS CELDAS DE REDUCCIÓN DE ALUMINIO HAL-230 DE CVG VENALUM

Francisco Rojas<sup>1</sup>, Imer Malavé<sup>1</sup>, Angel Birrot<sup>2</sup>

(Recibido octubre 2012, Aceptado noviembre 2012)

<sup>1</sup>UNEXPO Vice-Rectorado Puerto Ordaz - Venezuela, <sup>2</sup>CVG VENALUM  
frojashdez37@gmail.com, imer.malave@hotmail.com, angel.birrot@venalum.com.ve

**Resumen:** El siguiente trabajo consiste en una simulación termoeléctrica para un nuevo modelo del Sistema Anódico, con un yugo de 4 puntas centrado y un bloque anódico de dimensiones 1500 mm, 790 mm y 610 mm para ser usado en las Celdas de Reducción de Aluminio Hal-230 de C.V.G VENALUM, realizado con el programa de elementos finitos ANSYS. Debido a que la varilla anódica no está centrada en el yugo se incluye un incremento en el área inferior de la varilla anódica a objeto de mantener el mismo flujo de corriente a través de cada uno de los 4 brazos del yugo. El resultado de la simulación muestra que el nuevo modelo implica mayor eficiencia eléctrica de las celdas, ya que corrige las asimetrías en las distribuciones de temperatura, potencial eléctrico y densidad de corriente que presentó el fracasado modelo anódico 1500 mm, 790 mm y 560 mm, yugo 3 puntas no centrado, el cual fue puesto a prueba durante más de un año. También, el incremento en el volumen del bloque anódico implica un aumento en su vida útil de 3 días, lo que contribuye a mejorar aún más la estabilidad eléctrica de las celdas.

**Palabras claves:** Celdas de Reducción de Aluminio/ Corriente eléctrica/ Eficiencia y estabilidad eléctrica/ Sistema Anódico/ Simulación termoeléctrica.

## NEW MODEL OF ANODIC SYSTEM TO IMPROVE ELECTRICAL EFFICIENCY IN 230-HAL AT CVG-230 VENALUM

**Abstract:** The present work consists of a thermoelectric simulation for new model Anodic System with a centered 4-tip yoke and an anode block of dimensions 1500 mm, 790 mm and 610 mm to be used Hal-230 Aluminum electrolytic cells at CVG VENALUM, performed with ANSYS finite element program. Since the anode rod is not centered on the yoke, an increase in the lower area in dimension in the lower area of the anode rod was made, in order to maintain a uniform flow of through the four arms of the yoke. The out coming result of this simulations shows an enhancement in the electrical efficiency of the cells, since it corrects the asymmetries in temperature distribution, electric potential and current density which were present in the former non centered 3-tip yoke anodic of dimension 1500 mm, 790 mm and 560 mm, that was tested for over a year. It was also that the increase in the volume of this new anode block generated an increase of 3 days in its operating life, which contributes to further improve the electrical stability of the cells.

**Keywords:** Aluminum Reduction Cell/ Electric Current/ Electrical Efficiency/ Thermoelectric Simulation/ Anodic System.

### I. INTRODUCCIÓN

Los grandes complejos industriales en su proceso de producción de aluminio primario consumen inmensas cantidades de energía eléctrica, entre 13,4 y 16,3 kilovatios hora por kilogramo de aluminio producido (kwh/kgAl) [1]. El proceso se lleva a cabo en las celdas de reducción electrolíticas, tipo Hall-Heroult (ver Figura 1), que en adelante se denominaran Celdas de Reducción de Aluminio (CRA), las cuales operan todo el día con altas

intensidades de corriente, en el orden de centenas de kA, y un voltaje de celda inferior a los cinco voltios.

La energía necesaria para producir el aluminio proviene del flujo de corriente eléctrica que entra a las CRA a través de las varillas anódicas, pasando luego al bloque anódico, baño electrolítico, aluminio primario producido y los bloques catódicos. En el interior de los bloques catódicos se encuentran las barras colectoras, las cuales se

encargan de recoger toda la corriente que luego va a ser transportada a la siguiente celda, la cual se encuentra en serie con sus celdas vecinas.

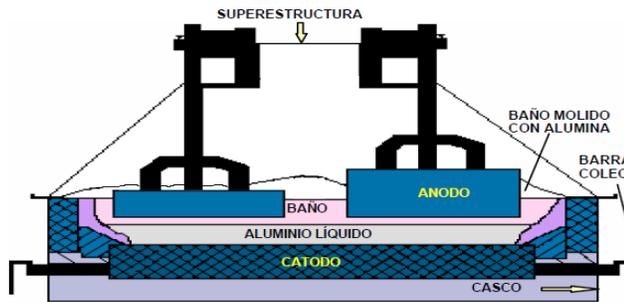
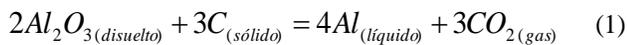


Figura 1. Celda de Reducción de Aluminio, Corte transversal.

El aluminio se produce debido a la reacción química que ocurre entre el bloque anódico, compuesto mayormente de Carbono,  $C$ , y la alúmina,  $Al_2O_3$ , de acuerdo a la siguiente reacción:



En donde el oxígeno de la alúmina se combina con el Carbono del bloque anódico para producir dióxido de carbono,  $CO_2$ , en forma de gas y Aluminio líquido,  $Al$ , que se precipita al cátodo, a una temperatura de aproximadamente  $960\text{ }^\circ\text{C}$ . En una CRA Hall-Heroult típica se consumen entre 0,4 y 0,5 kg del bloque anódico por cada kg de Aluminio producido [2].

La principal empresa productora de aluminio de Venezuela C.V.G. VENALUM usa en promedio  $14,7\text{ kWh/kgAl}$  y tiene una capacidad de producción anual superior a las 430000,00 toneladas métricas, lo que da una idea de la inmensa cantidad de energía eléctrica que se consume. Esta empresa posee en total 905 CRA, 720 son de tecnología Reynolds P-19, 180 son de tecnología Hydro Aluminium Hal-230 y 5 celdas de tipo V-350 de tecnología Venezolana, que operan con corrientes de entrada de 160, 226 y 320 kA, respectivamente y tienen una caída de potencial promedio aproximadamente de 4,6 voltios.

El complejo V línea de C.V.G. VENALUM posee las 180 CRA de tipo Hal-230, ver Figura 2, las cuales demandan gran consumo de energía eléctrica según se observa en la Tabla I.

Sólo en V línea se consumen diariamente 4,5 millones de kWh, lo que equivale al consumo mensual de 90000 hogares a razón de 1500 kWh mes. Una disminución de 10 mV en todas las Hal-230 equivale a un ahorro de 292896,0 kWh mes, lo que equivale al consumo mensual de 195 hogares.

Tabla I. Parámetros de la CRA Hal-230 de CVG VENALUM

Corriente entrada (kA)	226,0
Voltaje de celda (V)	4,5-4,6
Potencia por celda (kW)	1039,6
Consumo diario por celda (kWh)	24950,4
Consumo diario V línea (kWh)	4491072,0

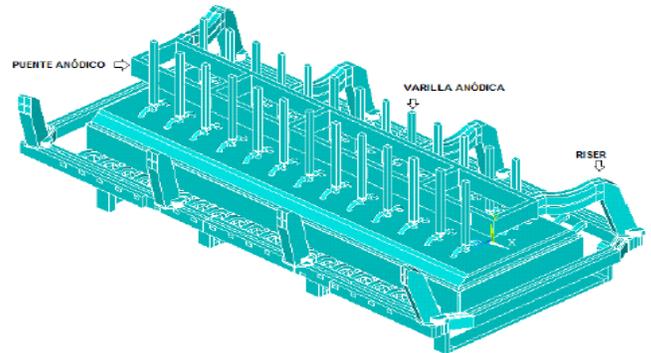


Figura 2. CRA Hal-230 de CVG VENALUM

CVG VENALUM con el propósito de aumentar la producción de aluminio y de mejorar la eficiencia eléctrica de las CRA Hal-230 puso a prueba durante más de un año (a mediados 2007-2008), en 15 celdas, el modelo anódico 1500 mm, yugo 3 puntas no centrado en el bloque anódico [3]. El nuevo modelo del bloque anódico sólo presentaba un incremento en una de sus longitudes con respecto al Sistema Anódico (SA) actual, bloque anódico 560 mm, 790 mm, 1400 mm (ver figura 3), cuya longitud se incrementó desde 1400 mm hasta 1500 mm. El yugo 3 puntas no está centrado en el bloque anódico 1500 mm porque la geometría de este tipo de CRA impide su ingreso, (ver Figura 2), en consecuencia el yugo se desplazó 100 mm respecto al centro del bloque anódico.

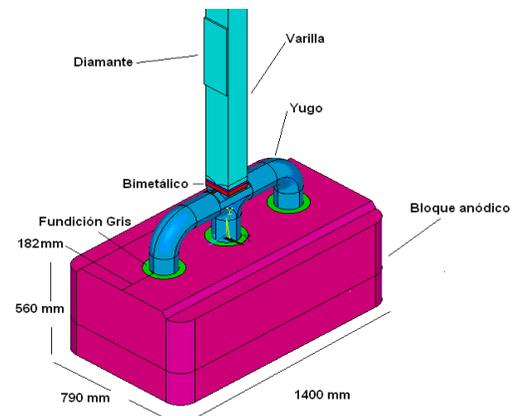


Figura 3. SA con bloque anódico 1400 mm usado actualmente

El aumento en dicha longitud implicaba un incremento de la masa del bloque anódico de 64 kg, con lo cual se esperaba un aumento de la vida útil del ánodo de tres días. Sin embargo, el modelo 1500 yugo 3 puntas asimétrico fracasó, debido a que no se incrementó la producción de aluminio, se mantuvo la inestabilidad de las CRA por encima de los niveles permitidos y aumento de la vida útil del ánodo en apenas un día. También, se mantuvo el consumo de aditivos químicos.

Las simulaciones termoeléctricas para el SA 1500 mm, yugo no centrado, mostraron claras asimetrías en las distribuciones de potencial eléctrico y densidad de corriente, mientras que la distribución de temperatura es casi simétrica. Las asimetrías en las distribuciones de densidad de corriente (que producen asimetrías en el campo magnético del metal) son factores adicionales que influyen en la disminución de la eficiencia eléctrica de las celdas, ya que producen mayores turbulencias en el metal y en el baño electrolítico [3-4]. También, mostraron un incremento muy significativo en su corriente transversal a partir del día 21 de consumo del bloque, la cual implica incremento inestabilidad eléctrica a partir de ese día [5], fenómeno que consiste en grandes variaciones de la resistencia eléctrica de las CRA.

En septiembre de 2010 se propusieron 4 nuevos modelos de SA, yugo 4 puntas, con las mismas dimensiones del fracasado bloque anódico 1500 mm. Las simulaciones termoeléctricas mostraron que en los 4 modelos se lograron corregir las asimetrías de las distribuciones de temperatura, potencial eléctrico y densidad de corriente [6]. El incremento en las puntas del yugo ayuda a disminuir el campo magnético en el metal y el baño, logrando producir una disminución en su fuerza magnética. La Fuerza magnética es la responsable de los en los movimientos transversales y longitudinales de las partículas cargadas en el metal y el baño electrolítico. En este trabajo se propone un nuevo modelo de SA, yugo 4 puntas centrado en el bloque anódico, varilla anódica no centrada en el yugo, con el cual se espera corregir las asimetrías que presentó el fracasado modelo 1500 mm, incrementar la vida útil del bloque anódico y mejorar la estabilidad y la eficiencia eléctrica de las CRA Hal-230.

Los detalles del nuevo se presentan parte 2 de este trabajo, en la 3 se exponen los resultados de las simulaciones y en 4 se muestra un resumen de las conclusiones más importantes de esta investigación.

## II. DESARROLLO

### Modelado computacional del nuevo SA Yugo 4 puntas centrado para las celdas Hall-230 de la V Línea de C.V.G. VENALUM

En la Figura 4 se muestra la vista frontal del nuevo modelo de SA realizado en el programa de simulación ANSYS, cuyas dimensiones son 610 mm x 790 mm x 1500 mm. Se observan tres nuevas modificaciones importantes:

- Incremento en la altura del bloque anódico en 50 mm, con lo cual se espera aumentar la vida útil del ánodo en tres días y evitar su inestabilidad eléctrica a partir del día 21 de consumo.
- Modificación del ángulo de curvatura del yugo de 90° a 45°, para permitir la entrada del nuevo SA en la CRA sin problemas de contacto con las tapas (que no se muestran en la figura 2) que cierra las celdas.
- Incremento en el área inferior de la varilla anódica, de tal manera que se mantenga el mismo flujo de corriente en cada uno de las 4 puntas del yugo.

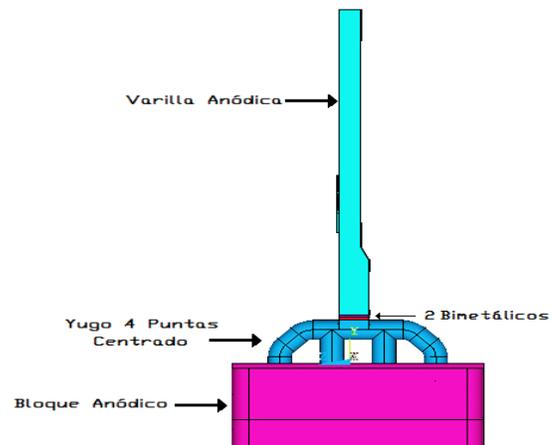


Figura 4. Vista frontal de SA yugo 4 puntas centrado

El modelo usado es un SA con un ánodo con un día de operación, por lo cual posee poco desgaste. El ánodo está sumergido en el baño electrolítico a una profundidad aproximada de 20 cm. La temperatura en la zona externa que hace contacto con el baño es de 960 °C=1233 K. El coeficiente de convección de la zona de las celdas Hall-230 de la V Línea es de 24 W/m<sup>2</sup> °C. La corriente que entra por la varilla es de 8,00 kA. El potencial eléctrico asociado a la cara inferior del carbón anódico es el potencial referencia, igual a cero.

El modelo está formado por la varilla anódica, dos bimetalicos, fundición gris, yugo 4 puntas y el bloque anódico. La fundición gris no se observa en el modelo porque se encuentra en la unión de las puntas del yugo con el bloque anódico. Los materiales del modelo son mostrados en la Tabla II y las características de los materiales utilizados para el modelado del ánodo son la resistividad eléctrica, la conductividad térmica y la densidad, cuyos valores son iguales a los usados [8-9]. Sólo las densidades de los materiales se consideran constantes. La resistividad eléctrica y la conductividad térmica en todos los materiales del SA se asumen isotrópicos y no lineales (dependientes de la temperatura).

Tabla II. Materiales del SA

Elementos del SA	Tipo de material
Varilla	Aluminio 6063-T6
Bimetálico 1	Aluminio 6063-T6
Bimetálico 2	Acero 304L
yugo	Acero ASTM 105
Fundición gris	Fundición gris 3% C
Bloque anódico	Carbón anódico

**Ecuaciones termoeléctricas**

En todos los nodos del modelo del SA, la distribución de potencial eléctrico la obtiene el programa de elementos finitos Ansys a partir de la conocida ecuación:

$$\nabla \circ ([\sigma(T)]\nabla V) = 0 \tag{2}$$

donde  $[\sigma(T)]$  es la matriz de conductividad eléctrica, la cual es dependiente de la temperatura ( $T$ ).

$$[\sigma(T)] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}(T) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy}(T) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz}(T) \end{bmatrix} \tag{3}$$

Los elementos diagonales de la matriz de conductividad son iguales,  $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=\sigma_{zz}$ , debido a las condiciones de homogeneidad e isotropía que hemos impuesto en el modelo. Conocido el potencial eléctrico,  $V$ , el vector intensidad del campo eléctrico,  $\{E\}$ , se calcula mediante la ecuación de la electrostática:

$$\{E\} = -\nabla V \tag{4}$$

El vector densidad de corriente,  $\{J\}$ , se obtiene por medio de la ley de Ohm:

$$\{J\} = [\sigma(T)] \{E\} \tag{5}$$

Similarmente, el programa calcula la distribución de temperatura  $T(x, y, z)$  del SA por medio de la ecuación para la transferencia de calor:

$$\nabla \circ ([K]\nabla T) + \bar{q} = 0 \tag{6}$$

donde  $\bar{q}$  es la velocidad de generación de calor por unidad de volumen producida por efecto Joule y  $K$  es la matriz de conductividad térmica, definida por:

$$[K(T)] = \begin{bmatrix} K_{xx}(T) & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy}(T) & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz}(T) \end{bmatrix} \tag{7}$$

Los elementos diagonales son iguales debido a las condiciones de homogeneidad e isotropía asumidas. También, todo programa de elementos finitos necesita las condiciones de contorno para resolver este conjunto de ecuaciones diferenciales del problema en particular estudiado. Las condiciones de contornos utilizadas para el modelo son las siguientes:

$$T(x, y_0, z) = T_A \tag{8}$$

la cual especifica la temperatura constante ( $T_A=960^\circ C$ ) sobre las superficies del fondo del ánodo, en equilibrio térmico con el baño; y la condición de flujo de calor dada por

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_S - T_\infty) \tag{9}$$

en donde  $h$  son los coeficientes peliculares sobre las superficies sometidas a flujo de calor por convección,  $T_S$  es la temperatura de la superficie y  $T_\infty$  es la temperatura del medio en contacto con la superficie

El potencial eléctrico en un contorno está dada por:

$$V(x, y_1, z) = V_A \tag{10}$$

la cual especifica  $V_A=0$  voltios en cara inferior del bloque anódico. El programa también asume en las interfaces las siguientes condiciones por defecto

$$E_{t1} - E_{t2} = 0 \tag{11}$$

$$J_{n1} - J_{n2} = 0 \tag{12}$$

Los subíndices  $t$  y  $n$  indican respectivamente las componentes tangenciales y normales a las interfaces. La ecuación (11) garantiza la condición de equilibrio electrostático del campo eléctrico y la (12) garantiza la continuidad de la componente normal de la corriente.

**III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En esta parte se discuten los resultados de las simulaciones termoeléctricas primeramente para el fracasado modelo 1500, yugo 3 puntas no centrado, y luego para el nuevo modelo yugo 4 puntas centrado. Ambos modelos presentan las mismas condiciones operativas.

**SA 560 mm, 790 mm, 1500 mm, yugo 3 puntas no centrado o asimétrico**

En las Figuras 5-7 se observan las distribuciones de temperatura, potencial eléctrico y densidad de corriente del fracasado modelo de SA

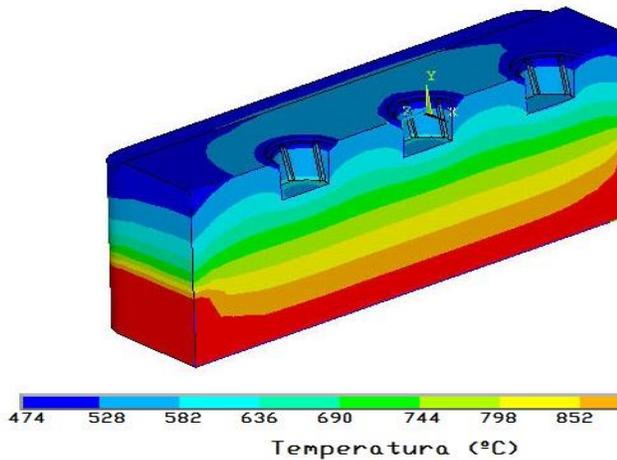


Figura 5. Distribución de temperatura en el corte transversal del interior del bloque anódico

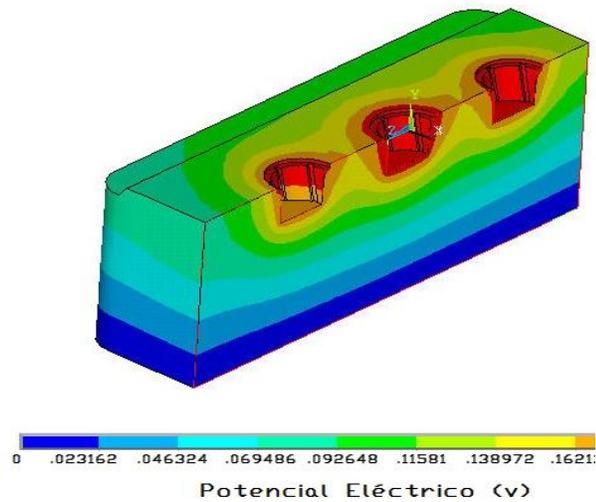


Figura 6. Distribución de potencial eléctrico en el corte transversal del bloque anódico.

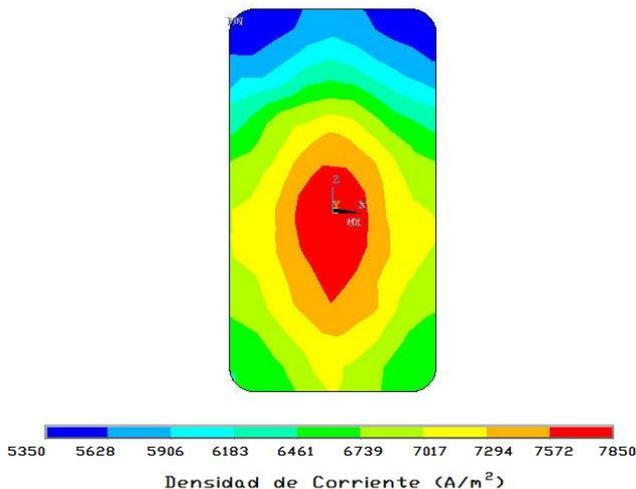


Figura 7. Distribución de la densidad de corriente en la cara inferior del bloque anódico.

A diferencia de la distribución de temperatura, las distribuciones de potencial eléctrico y de densidad de corriente en el bloque anódico presentan notables asimetrías. La densidad de corriente en el fondo del bloque anódico varía entre 5350 y 7850 A/m<sup>2</sup> (con una incertesa de  $\pm 50$  A/m<sup>2</sup>), la asimetría y la alta densidad de corriente (en el centro) inciden negativamente en la estabilidad y la eficiencia de la CRA. La mayor simetría en la distribución de temperatura se explica porque una porción inferior del bloque anódico está sumergido en el baño eléctrico, lo cual lo obliga a estar en equilibrio térmico a 960 °C.

**SA 610 mm, 790 mm, 1500 mm, yugo 4 puntas centrado o simétrico**

En las Figuras 8-10 se observan las distribuciones de temperatura, potencial eléctrico y densidad de corriente para el nuevo SA propuesto.

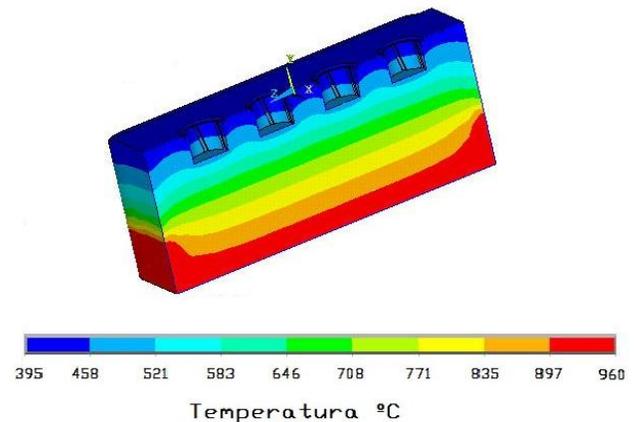


Figura 8. Distribución de temperatura en corte transversal del bloque anódico

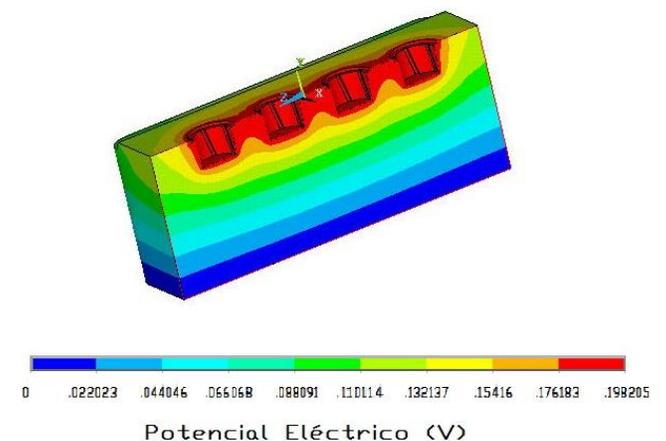
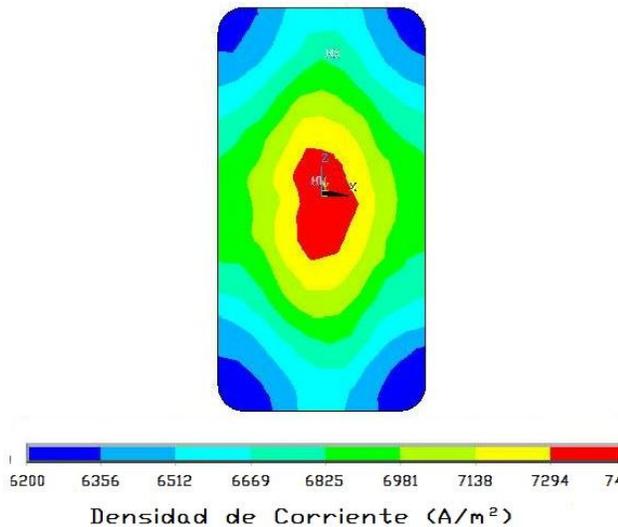


Figura 9. Distribución del potencial en el corte transversal del bloque anódico



**Figura 10. Distribución de la densidad de corriente en la cara inferior del bloque anódico.**

Las simulaciones muestran simetrías en las distribuciones de temperatura, potencial eléctrico y densidad de corriente. La densidad de corriente máxima es de 7450 A/m<sup>2</sup>, menor que los 7850 A/m<sup>2</sup> del SA anterior, y su valor mínimo es 6200 A/m<sup>2</sup>, lo que implica una mayor suavidad en la variación de su densidad de corriente con respecto al fracasado SA 1500 yugo 3 puntas no centrado, esto se debe a la incorporación de una nueva punta en yugo. La mayor suavidad y la disminución de la densidad de corriente máxima en el nuevo modelo de SA equivalen a un menor campo magnético en el baño y en el metal, lo que implica una disminución de fuerza magnética en las zonas anteriores. De esta manera, es de esperar que la menor turbulencia en el baño y el metal contribuyan a mejorar la estabilidad y la eficiencia eléctrica de las CRA Hal-230.

Igualmente, una mayor estabilidad eléctrica de las celdas implica que se puede disminuir la distancia entre el fondo bloque anódico y el metal, lo que se conoce como la distancia ánodo cátodo, lo que implicaría una disminución en caída de potencial eléctrico en las celdas.

#### IV. CONCLUSIONES

1. Las distribuciones de temperatura, de potencial eléctrico y densidad de corriente presentan altas simetrías en el bloque anódico para el nuevo modelo de SA yugo 4 puntas centrado.
2. La densidad de corriente máxima para el nuevo modelo de SA es menor que del SA 1500 mm anódico yugo 3 puntas no centrado, lo que implica una disminución en la fuerza magnética en el baño y el metal, lo que debe contribuir a mejorar la estabilidad y la eficiencia eléctrica de las CRA.

3.- El Incremento en la altura del bloque anódico en 50 mm equivale a incrementar la vida útil del ánodo en tres días, y por lo tanto, se disminuirían las inestabilidades eléctricas de las celdas por efecto de cambio de ánodos.

4.- Se espera un menor uso de aditivos químicos en las CRA, contaminantes del medio ambiente, como consecuencia de la mayor estabilidad eléctrica de las celdas

#### V. REFERENCIAS

1. Gutiérrez, Edgar y Troyani, Nando. "Formulación Variacional del Problema Termoeléctrico de una Celda de Reducción de Aluminio Hall-Héroult en Tres Dimensiones.". *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 1999, vol 3, núm. 9, pp. 25 - 29.
2. Grjoteim Kai y Welch Barry. *Aluminium Smelter Technology*. Dusseldorf: Editorial Aluminum Verlag, 165.168 pp. ISBN 3-37017-162-6.
3. Panaitescu, Augustin; MORARU, Aureliu. "Research on the instabilities in the aluminum electrolysis cell", *Light Metals*, 2003, pp. 359-366
4. Panaitescu, Augustin. "Magneto-hydro-dinamic analysis of an electrolysis cell for aluminum production", *IEEE Trasaction on Magnetics*, 2000, vol. 36, núm. 4, pp. 1305-1308.
5. Rojas, F.; Birrot, A.; Caraballo A. "Simulación de la evolución termoeléctrica del Sistema Anódico 1500 mm asimétrico en las Celdas Hal-230 de C.V.G". Memorias de las IX Jornadas de Investigación 2011, Puerto Ordaz, Julio. 2011.
6. Rojas, Francisco; Birrot, Ángel; Requena, Durlyn; Malave, Imer. "Propuestas de mejoras en el Sistema Anódico en Celdas Hal-230 de V línea de C.V.G. VENALUM", *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 2010, vol. 14, núm. 56, pp. 189-203.
7. Rojas, Francisco; Birrot, Ángel; Malave, Imer. "Simulación de las caídas de potenciales en el sistema anódico producidas por las variaciones de la profundidad del yugo en el ánodo de una celda de reducción de aluminio", *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 2007, vol. 11, núm. 43, pp. 79-86.
8. Malavé, Imer. " Estudio de la eficiencia termoeléctrica del sistema anódico en celdas Hall-230 De La V Línea de C.V.G. Venalum". Director: Francisco Rojas. Tesis de Pregrado de Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" (UNEXPO), Puerto Ordaz, Venezuela, 2007.