

GENERADORES DE VÓRTICES - EFECTO EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

Jonathan J. Dorella^a, Luciano Garelli^a, Gustavo A. R. Rodríguez^a y Mario A. Storti^a

^a*Centro de Investigaciones de Métodos Computacionales, (CIMEC), (CONICET-UNL)
Colectora Ruta 168 s/n, Predio Conicet "Dr. Alberto Cassano", 3000 Santa Fe, Argentina,
jonathandorella@gmail.com
<http://www.cimec.org.ar>*

Palabras Clave: generadores de vórtices, transferencia de calor, radiadores de transformadores eléctricos.

Resumen.

El rendimiento de los intercambiadores de calor es un factor clave en muchas aplicaciones industriales, como en el acondicionamiento de aire, en la ingeniería química y en transformadores eléctricos de potencia, entre otras. Mejorar la transferencia de calor con dispositivos pasivos es importante, ya que en muchas situaciones no es asequible instalar ventiladores para aumentar la capacidad de refrigeración de la máquina. El objetivo de este trabajo es llevar a cabo un estudio numérico paramétrico de un sólo generador de vórtices, aplicado sobre una aleta de un radiador en un transformador eléctrico de potencia cuya refrigeración es del tipo aceite-aire por convección natural (ONAN por Oil-Natural Air-Natural). El generador de vórtices considerado tiene forma de ala delta. El ángulo de ataque, relación de aspecto y la distancia de separación entre la superficie de la aleta y el borde de fuga del generador, se encuentran entre las variables que serán analizadas. El estudio de los distintos casos se realizará mediante simulaciones numéricas del flujo de aire utilizando técnicas de CFD, empleando el software de código abierto y licencia GNU-LGPL Code-Saturne (Archambeau et al., 2004) en un cluster de ordenadores, mientras que el pre- y post-procesado de las simulaciones numéricas se efectuará con el software Salome (Dharmit, 2014), también de código abierto y licencia GNU-LGPL. Los resultados obtenidos serán comparados, a los fines de validación, con aquellos disponibles en la literatura especializada.

1. INTRODUCCIÓN

Estudios analíticos y simulaciones numéricas realizadas mediante CFD (Computational Fluid Dynamics) acerca de la transferencia de calor en un radiador de un transformador de potencia funcionando en condición ONAN, indican que el aire es el elemento que presenta la mayor resistencia térmica en el sistema de disipación de energía, ya que su capacidad de extracción de calor evaluada a través del coeficiente de transferencia térmica que presenta es aproximadamente cinco veces menor que la del aceite (Ríos Rodríguez et al., 2016). Considerando esta situación, se plantea la posibilidad de utilizar dispositivos pasivos que permitan incrementar la transferencia de calor desde la superficie de la aleta hacia el aire por efectos convectivos. En este sentido, se presenta el siguiente estudio, que se centra en el análisis de generadores de vórtices para promover el ingreso de aire fresco desde el centro del canal de aire que se forma entre dos aletas del radiador, hacia la capa límite térmica en contacto con la superficie de las aletas. Las simulaciones por CFD y los estudios analíticos previos determinan que si bien el flujo de aire entre las aletas presenta turbulencia, la misma no es lo suficientemente enérgica como para remover el calor de la capa límite térmica.

Los generadores de vórtices pueden adoptar distintas formas geométricas, algunas de las cuales se presentan en la figura (1), tomada de Gentry y Jacobi (1997).

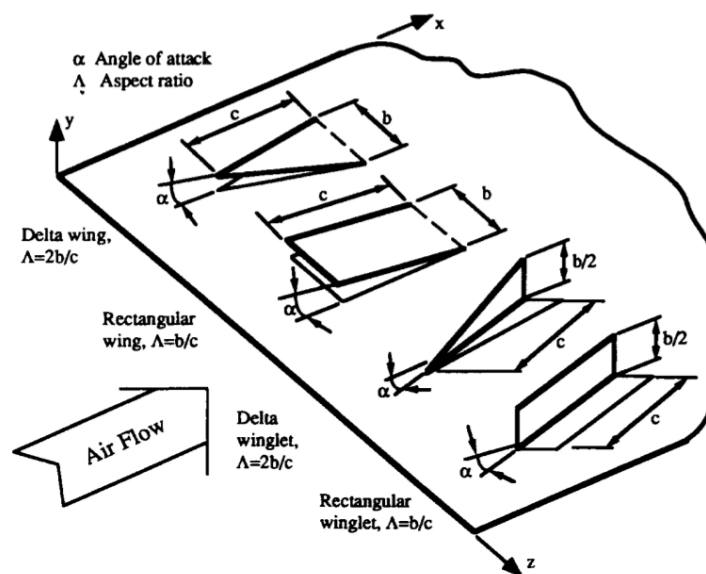


Figura 1: Distintos generadores de vórtices y sus correspondientes definiciones geométricas.

2. ESTADO DEL ARTE

En Gentry y Jacobi (1997) se presentan resultados experimentales para generadores de vórtices con forma de ala delta instalados sobre una placa plana horizontal, los cuales permiten confirmar un incremento máximo de entre el 50 % y el 60 % en la transferencia de calor y de masa promedios, para flujos de aire impuestos o forzados cuyos números de Reynolds basados en la longitud de la cuerda del ala varían entre 600 y 1000. Dichos Reynolds se corresponden con velocidades del flujo en la corriente libre que van desde $0.75[m/s]$ a $1.25[m/s]$, respectivamente. Estos valores de Reynolds y de velocidades del flujo se encuentran en el rango de valores encontrados experimentalmente en el banco de pruebas perteneciente a la empresa Tadeo Czerweny S.A. y con aquellos estimados previamente para el escurrimiento del aire entre

las aletas de los radiadores de transformadores eléctricos.

En dicho trabajo se encuentra que el mayor efecto benéfico, teniendo en cuenta las pérdidas de carga que se generan por la caída de presión por detrás del generador, ocurre cuando los centros de los vórtices se localizan en el borde de la capa límite, ya que de esta manera producen el adelgazamiento de la misma y advectan el flujo de la corriente libre hacia el interior de las capas límite térmica y fluido dinámica. Más recientemente en [Gentry y Jacobi \(2002\)](#), se presentan mediciones para el flujo en una placa plana y para flujo desarrollado en canales, de la caída de presión e incrementos en el coeficiente de transferencia de calor local y promedio debido a los vórtices producidos por generadores de vórtices del tipo ala delta. Se encuentra que, localmente, en las regiones donde un vórtice induce un flujo normal a la superficie, el coeficiente de transferencia de calor local se incrementa hasta en un 300% respecto del flujo base sin generadores de vórtices, dependiendo de la intensidad de los vórtices y de la ubicación de los mismos respecto de la capa límite.

3. ESTUDIO POR CFD 3D

3.1. Generador aislado

El presente estudio contempla el análisis del escurrimiento 3-D del aire alrededor de un generador de vórtices del tipo ala delta para distintos ángulos de ataque α y distintos despejes (distancia de separación del generador con respecto a la placa).

Los parámetros geométricos que definen al generador son: relación de aspecto $\Lambda = 1.0$ y longitud de la cuerda $c = 12.7[mm]$ (Ver Figura (2)) y se corresponden con aquellos valores utilizados en [Gentry y Jacobi \(1997\)](#).

Se propone estudiar inicialmente 3 (tres) ángulos de ataque del generador respecto del flujo, los cuales son $\alpha = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$.

El Reynolds basado en la longitud de la cuerda c es $Re = 800$ y se corresponde a una velocidad de la corriente libre igual a $V = 0.987[m/s]$, teniendo en cuenta que la densidad y la viscosidad cinemática del aire son, respectivamente, $\rho = 1.177[kg/m^3]$ y $\nu = 1.568e-5[m^2/s]$. Dichos valores se obtienen de [Lienhard y Lienhard \(2012\)](#) asumiendo una temperatura de referencia $T_{amb} = 30[C]$. La temperatura de ambas la placa superior e inferior del canal es $40[C]$ por sobre la temperatura del aire que ingresa al dominio del problema.

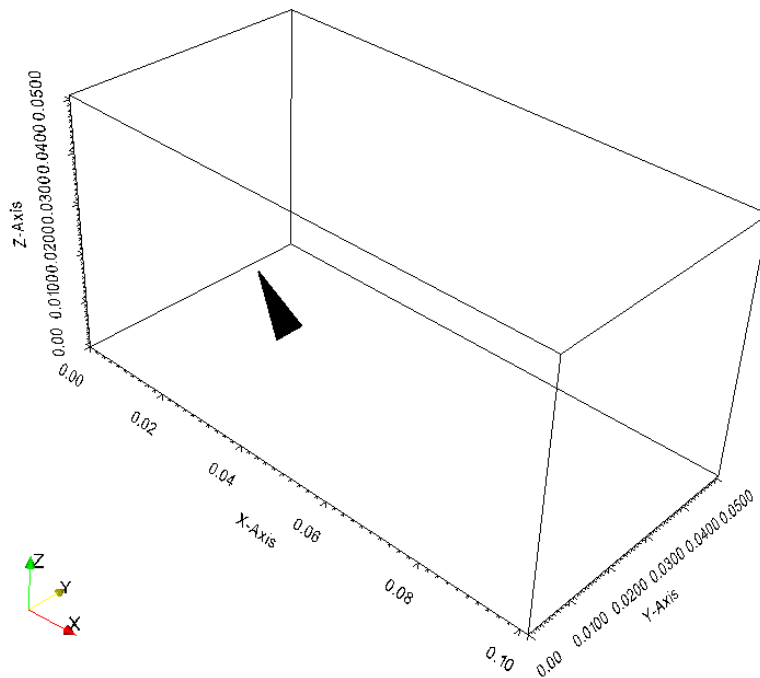


Figura 2: Geometría del canal y del generador de vórtices.

Las dimensiones del dominio computacional son $50.8[mm]$ de ancho, $101.6[mm]$ de largo y $50.8[mm]$ de alto. El generador se encuentra centrado según el eje Y (ancho del dominio) y su borde de fuga está ubicado a $2c$ aguas abajo de la sección de entrada del flujo, o sea, a $25.4[mm]$.

En una primera etapa se validó el modelo CFD utilizando los software open-source licencia GNU-GPL Salome y Code-Saturne, comparando con los resultados presentados en Gentry y Jacobi (1997). Allí se introduce un factor de bondad que tiene en cuenta el efecto del vórtice sobre la tasa de transferencia del calor. Dicho efecto se puede considerar que se debe a dos causas: por un lado la intensidad del vórtice y por otro, la ubicación del mismo relativo a la capa límite. Se determina en ese trabajo que el factor de bondad máximo para un generador con una relación de aspecto $\Lambda = 1,0$ se obtiene para $\alpha = 40^\circ$. Por otro lado, en las simulaciones realizadas en este trabajo se observa que la transferencia de calor máxima se obtiene para los mismos valores. Esto se puede ver en la figura (3) si se compara el flujo calor para un despeje de $0[mm]$.

Por otro lado, se procedió a estudiar el desempeño del generador de vórtices con el conjunto completo de parámetros mencionados anteriormente, comparando la transferencia térmica con un caso de referencia sin el generador, que se considera sobre la superficie superior del canal.

Los parámetros utilizados para generar las mallas son guardados en un *script* escrito en lenguaje python, el cual es leído por Salome, variando solamente el ángulo de ataque y el despeje.

Se simularon los tres ángulos de ataque α mencionados y los despejes utilizados son: $0[mm]$, $0.003175[mm]$ y $0.00635[mm]$. Con este conjunto de parámetros se confeccionó el gráfico de la figura (3) que muestra que la configuración óptima entre estas nueve se encuentra para $\alpha = 50^\circ$ y despeje de $0.003175[mm]$. El comportamiento que se observa se puede explicar de la siguiente manera: para un mismo ángulo de ataque la intensidad de los vórtices es la misma, por lo cual cuando el despeje es nulo, los vórtices se encuentran sumergidos en el interior de la capa límite

y el efecto de mejora en la transferencia es muy bajo. Al incrementarse el despeje los vórtices se alejan de la superficie de placa e inducen un mayor ingreso de aire fresco hacia el interior de la capa límite, aumentando la transferencia de calor. Si el despeje aumenta excesivamente, los vórtices ya se encuentran muy alejados de la capa límite y casi no tienen influencia.

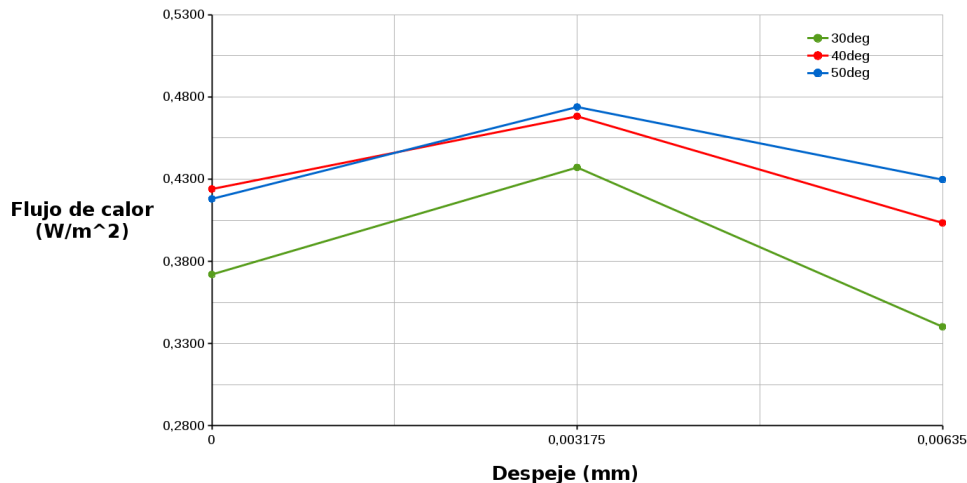


Figura 3: Influencia del despeje sobre la transferencia de calor para distintos ángulos de ataque.

3.2. Análisis del vórtice generado y su zona de influencia

La presente sección expone ciertos aspectos del campo de movimiento inducido por la presencia de los vórtices generados por el ala delta, a los fines de poder analizar cualitativamente los efectos que se observan en la transferencia de calor aguas abajo del generador. En las figuras (4) y (5) se puede observar que los mismos se generan a lo largo de todo el borde de ataque del ala delta como consecuencia de la diferencia de presión entre el intradós y extradós de la misma. En la figura (4), tanto las líneas de corriente como la superficie de la placa están coloreadas según la magnitud de la velocidad. De esta manera, la presencia de dos vórtices girando en sentido opuesto induce un flujo vertical hacia la superficie de la placa si se está entre ambos vórtices (lo cual se observa en un color más claro sobre la superficie de la placa), y un flujo vertical alejándose de la placa por fuera de ambos vórtices. Esto se observa más claramente sobre los distintos planos de corte perpendiculares a la superficie de la aleta que se representan en la figura (5). Allí se distinguen regiones de baja velocidad sobre la superficie de la placa debido a la presencia de la capa límite y en las cercanías de los núcleos de los vórtices. Por fuera de los núcleos de los vórtices, los mismos inducen un campo de movimiento que hace que, el flujo descendente hacia la placa produzca el adelgazamiento de la capa límite en esa zona mientras que el flujo con una componente ascendente por fuera de ambos vórtices produce un engrosamiento de la capa límite. A medida que los planos de corte se alejan del borde de fuga del generador, se observa que ambos vórtices se separan y la velocidad de flujo descendente entre ambos vórtices se incrementa aún más.

Por otro lado la figura (6) presenta, sobre los mismos planos de corte que en la figura (5), cómo los vórtices generados rompen la capa límite, introduciendo aire a menor temperatura a la zona en contacto con la placa que se encuentra por debajo y entre ambos vórtices y extrayendo el aire caliente en la región que se encuentre por afuera de ellos.

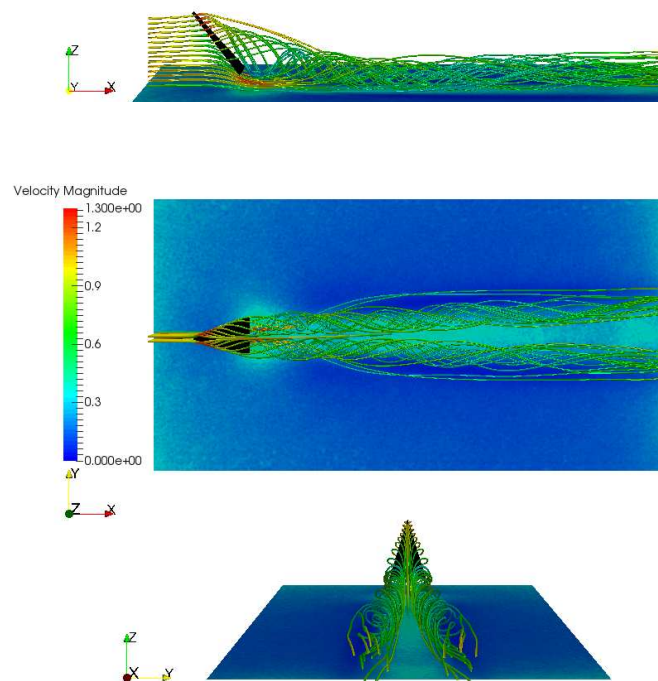


Figura 4: Campo de movimiento producido por el generador de vórtices - Líneas de corriente coloreadas según magnitud de la velocidad.

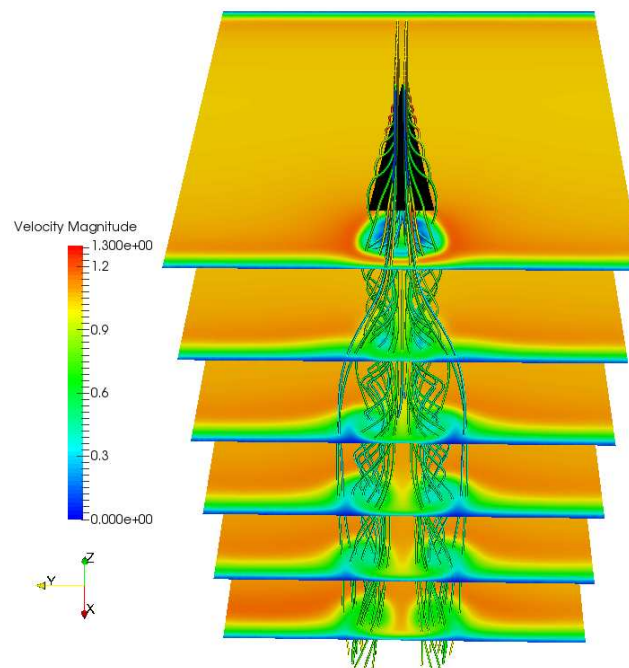


Figura 5: Imagen de planos perpendiculares equidistantes en escala de la velocidad.

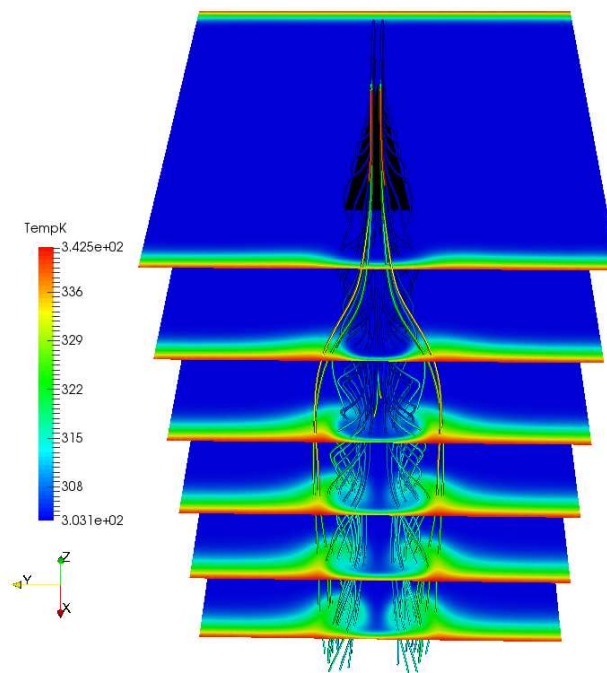


Figura 6: Imagen de planos perpendiculares equidistantes en escala de la temperatura.

El efecto que se produce sobre la transferencia térmica se puede determinar en función del flujo de calor, el cual se muestra en la figura (7). En la parte superior de la figura se muestra la transferencia sobre la placa plana, la cual será tomada como referencia para analizar los cambios introducidos por el generador.

En la zona de la placa por debajo del generador y en aquella que se encuentra entre los vórtices se aprecia un notable incremento en la transferencia de calor debido a que hay una componente del flujo de aire que es dirigido hacia la placa, mientras que en la zona externa a los vórtices hay una disminución de la transferencia de calor si se lo compara con el caso de la placa plana, ya que el aire con mayor temperatura es removido de la parte central del generador y desplazado hacia la parte exterior, disminuyendo la capacidad del aire para absorber más calor.

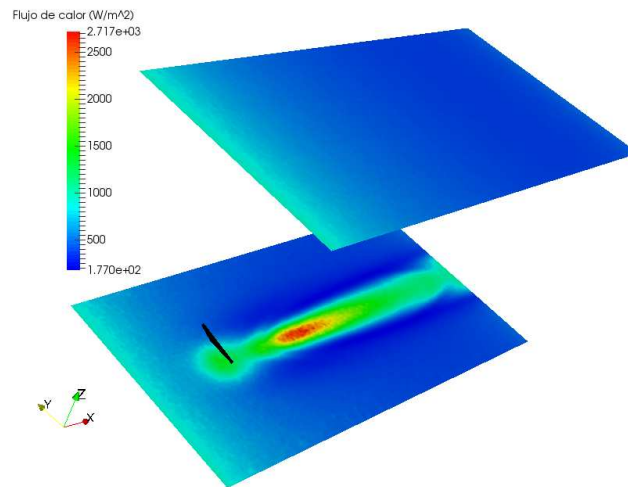


Figura 7: Flujo de calor [W/m^2].

En la figura (8) se muestran mediante líneas de colores las nueve posiciones para las que se representará el coeficiente de transferencia de calor según la dirección longitudinal (eje x). Estos colores se corresponden con los utilizados en la figura (9).

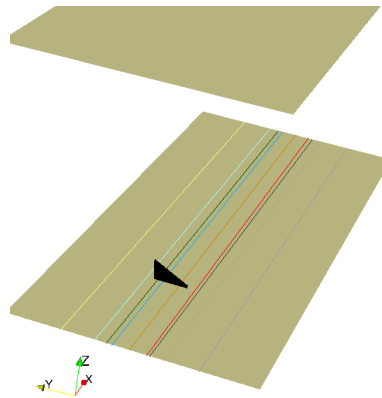


Figura 8: Posiciones para graficar el flujo de calor en la dirección longitudinal (eje x)

En las figuras (8) y (9), el trazo de color naranja corresponde con los valores del flujo de calor a lo largo de la línea que pasa por el centro del generador, mientras que los de colores amarillo claro y gris claro corresponden al flujo de calor evaluado a $\pm 1c$ ($12.7[mm]$) del generador (es decir, a la distancia de una cuerda con respecto al centro del generador).

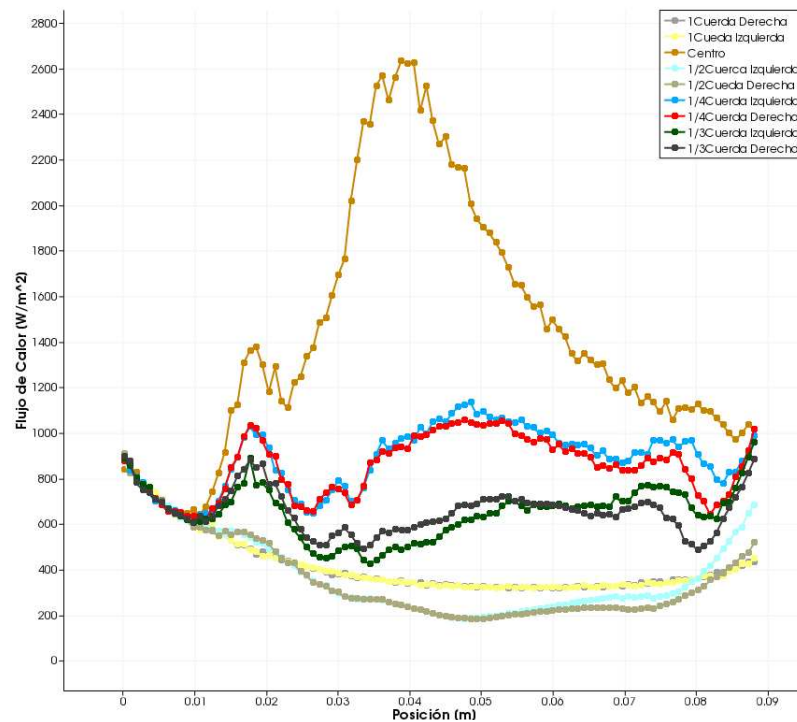


Figura 9: Gráfica de las distintas posiciones para el flujo de calor en la dirección longitudinal (eje x)

El generador incrementa entre 4 y 5 veces en promedio, la tasa de transferencia en una zona que se extiende hasta $40[mm]$ (aproximadamente 3 cuerdas) por detrás del mismo. Se observa que las mismas trazas sobre la placa de referencia, siguen una curva idéntica a las separadas una cuerda a cada lado (amarillo claro y gris claro) mostradas en la figura (9), lo que verifica que a esa distancia de separación lateral, la influencia del generador es nula (lo cual se corresponde al caso de la placa superior, sin el generador).

Podríamos definir como zona de efectividad transversal del mismo la cota de $0.25c$, lo que corresponde a la envergadura b (gráficamente corresponde a las trazas de color azul claro y rojo).

Adicionalmente es posible analizar la tasa de intercambio en diferentes secciones transversales, para lo cual se grafican los valores del flujo de calor inmediatamente detrás del generador, a una y a dos cuerdas, junto a otras distancias. En la figura (10) se muestran las ocho posiciones para las que se graficará el coeficiente de transferencia de calor en la dirección transversal (eje y).

En la figura (11) se puede observar el incremento en la tasa de transferencia en toda la zona detrás del generador.

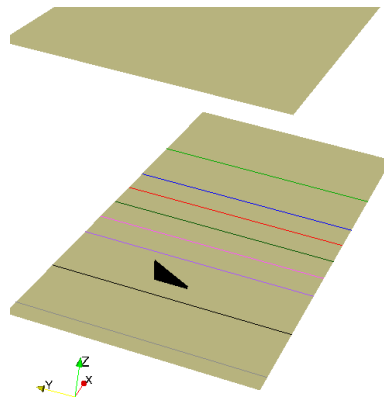


Figura 10: Posiciones para graficar el flujo de calor en la dirección transversal (eje y).

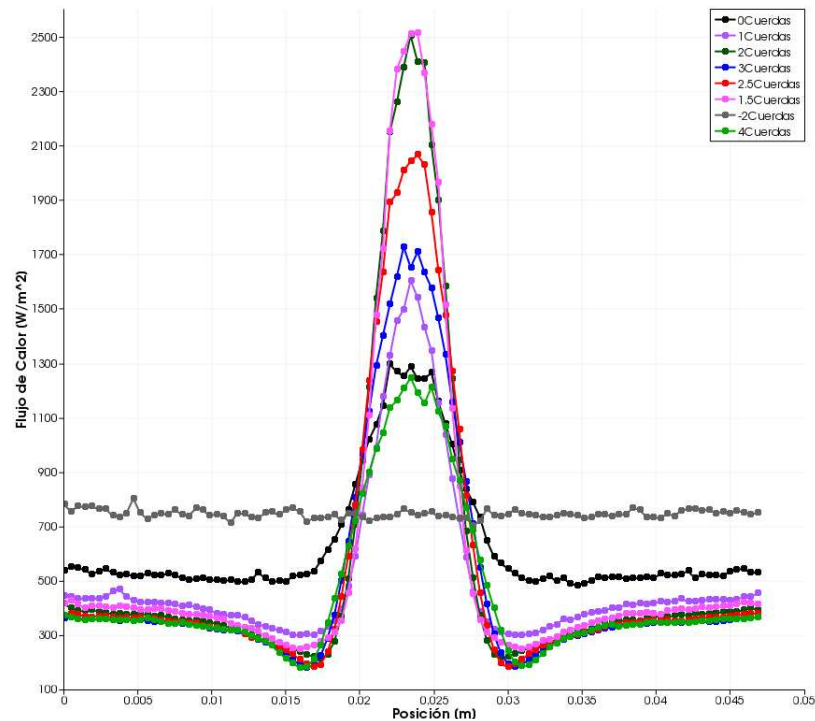


Figura 11: Gráfica de las distintas posiciones para el flujo de calor en la dirección transversal (eje y).

Podríamos definir como zona de efectividad longitudinal del mismo la cota de $3c$, o sea, $38.1 [mm]$ por detrás del generador (gráficamente corresponde a la traza de color azul).

Finalmente, si se considera la integral del flujo de calor en la región mostrada en la figura (12), la cual está delimitada una cuerda por delante del vértice del generador, tres cuerdas por detrás del borde de fuga y 0.25 cuerda hacia cada lateral a partir de su centro, se obtiene una disipación de $0.43 [W]$, mientras que la misma región pero sin la presencia del generador disipa $0.15 [W]$, lo que representa un 286.7 % más.

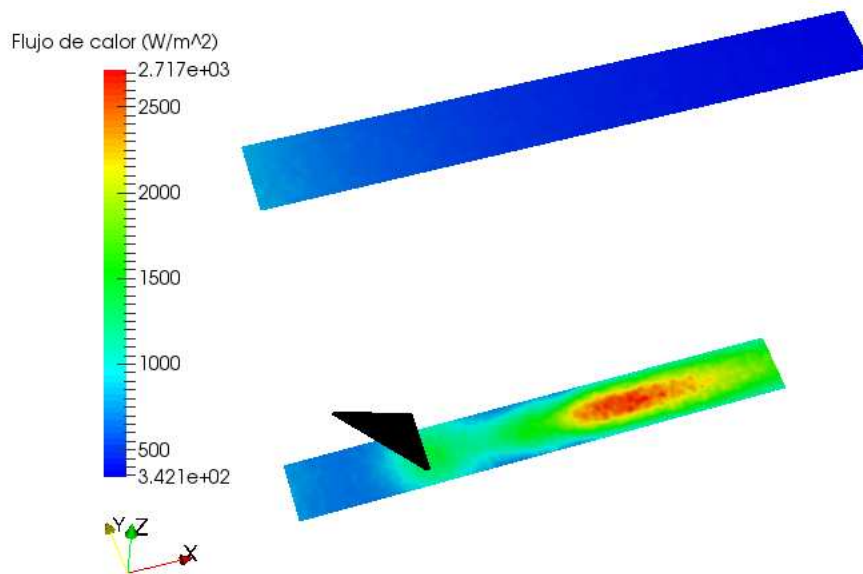


Figura 12: Flujo de Calor para la región de influencia óptima.

4. CONCLUSIONES

Se observa que la utilización de dispositivos pasivos tales como los generadores de vórtices presentados en este trabajo permiten mejorar notablemente la transferencia de calor. Esto se debe a que los vórtices inducen un flujo de aire cuya componente normal a la placa por un lado introduce aire a menor temperatura desde la corriente media hacia la capa límite donde el aire se encuentra a mayor temperatura y por otro, a extraer el aire caliente de la capa límite llevándolo hacia la corriente media, produciendo un efecto de mezclado. Las simulaciones numéricas permiten analizar la región de influencia de un generador de vórtices, tanto hacia los costados como por detrás del mismo. Se determina que dicha zona es de aproximadamente tres cuerdas aguas abajo del borde de fuga y de 0.25 cuerdas lateralmente consideradas desde el centro del generador. El análisis integral realizado permite estimar que el incremento en la tasa de transferencia de calor en el área delimitada por esas cotas es casi tres veces aquella de la misma área pero sin la presencia del generador. Esto beneficiaría el diseño de la máquina completa, y no sólo el del intercambiador de calor, ya que se podría reducir el tamaño físico del transformador de potencia eléctrica del tipo ONAN, además se podría disminuir la cantidad de aceite necesario.

Por otra parte, para un trabajo a futuro se considera realizar un análisis para cuantificar el incremento en la pérdida de carga debido a la inclusión de un arreglo de generadores en la corriente de aire y determinar si puede existir una reducción significativa de la velocidad, optimizando su zona de efectividad para aumentar la transferencia de calor disminuyendo al mínimo la caída de presión. También se pretende analizar el funcionamiento de este mismo generador de vórtices para el caso de un transformador en ONAF (Oil-Natural Air-Forced).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento recibido por parte de: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina, grant PIP 11220150100588CO), Universidad Nacional del Litoral (UNL, Argentina, grant CAI+D 2011-01-00012-LI, CAI+D-501-201101-00233-LI), Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT, Argentina, grants PICT 2660-14, PICT-E 0191-14, PICT 0938-13, PICT-2015-2904), Secretaría

de Ciencia, Tecnología y Producción para la Defensa (grant PIDDEF-4/14), Agencia Santafesina de Ciencia, Tecnología e Innovación (ASACTEI, Argentina, grant 00010-18-2014).

Este trabajo se realizó con software libre *Free Software Foundation/GNU-Project* como GNU–Linux OS, GNU–GFortran, GNU–Octave, GNU–Git and GNU–GIMP, como así también NETGEN, Para-View, Xfig and \LaTeX .

Además, los autores han hecho uso del cluster “Seshat”, el cual es parte del centro de cómputo del CIMEC. Este centro de cómputo está integrado al Sistema Nacional de Computación de Alto Desempeño (SNCAD), el cual es un proyecto en conjunto del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (MINCyT) y el Consejo Interinstitucional de Ciencia y Tecnología (CICyT).

REFERENCIAS

- Archambeau F., Méchitoua N., y Sakiz M. *Code Saturne: a finite volume code for the computation of turbulent incompressible flows—industrial applications*. Int. J. Finite Vol. 1(1), 1–62. ISSN 1634(0655), 2004.
- Dharmit T. *Finite Element Analysis Using Open Source Software*. Int. J. Finite Vol. 1(1), 1–62. ISSN 1634(0655), 2da edición, 2014.
- Gentry M. y Jacobi A. Heat transfer enhancement by delta-wing vortex generators on a flat plate: Vortex interactions with the boundary layer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14:231–242, 1997.
- Gentry M. y Jacobi A. Heat transfer enhancement by delta-wing-generated tip vortices in flat-plate and developing channel flows. *Journal of Heat Transfer*, 124(6):1158–1168, 2002.
- Lienhard J.H.I. y Lienhard J.H.V. *A Heat Transfer Textbook*. Plhogiston Press, Cambridge Massachusetts, 4th edición, 2012.
- Ríos Rodriguez G., Garelli L., Storti M., Granata D., Amadei M., y Rossetti M. Numerical and Experimental Thermo-Fluid Dynamic Analysis of a Power Transformer working in ONAN mode. *Applied Thermal Engineering*, 2016. ISSN 1359-4311. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.171>.