

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL FLUJO TURBULENTO BIDIMENSIONAL EN EL CONJUNTO CARACOL-DISTRIBUIDOR DE UNA TURBINA HIDRÁULICA

EUGENIO SANSONE, RUBÉN E. MORENO LEVI, RAFAEL P. URIBE

Departamento de Energética, Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Central de Venezuela. Apartado Postal 1041, Caracas, Venezuela. Tel: +58-212-6951796.

e-mails: eugenio.sansone@ucv.ve / rubenlevy_eimucv@hotmail.com / uribe.p.rafael@gmail.com

Recibido:

Aprobado para publicación:

RESUMEN

En este trabajo se realizó el análisis bidimensional del flujo turbulento en el conjunto caracol-distribuidor de una turbina hidráulica tipo Kaplan, ubicada en el galpón de máquinas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, mediante el método del elemento finito. El programa computacional utilizado para el proceso de cálculo y el post proceso, fue un código académico desarrollado por el profesor Eugenio Sansone. El dominio se discretizó a través de una malla multibloques conformes con elementos cuadrilaterales. El dominio de estudio corresponde a una sección plana transversal al eje de la turbomáquina que contiene los álabes del distribuidor. Se obtuvieron los campos de velocidades y presión para tres ángulos de apertura del distribuidor. Las condiciones de contorno aplicadas fueron: una distribución de velocidades a la entrada del caracol, una distribución de presión flotante a la salida y una condición de no deslizamiento en las paredes del caracol y del distribuidor. Se utilizó el modelo de turbulencia conocido como submalla de Smagorinsky implementado en el método de simulación de grandes escalas (LES).

Palabras clave: caracol turbina Kaplan, distribuidor, flujo turbulento, método del elemento finito, simulación de grandes escalas

NUMERICAL ANALYSIS OF A BI-DIMENSIONAL TURBULENT FLOW IN THE WHOLE SCROLL-DISTRIBUTOR OF A HYDRAULIC TURBINE

ABSTRACT

In this work the two-dimensional analysis of turbulent flow in the whole scroll-distributor of a hydraulic turbine type Kaplan, located in the shed of machines at the School of Mechanical Engineering of the Central University of Venezuela, using the Finite Element Method was performed. The software used for the process and post processing was an academic code developed by Professor Eugenio Sansone. The domain is discretized through a multiblock accordance with quadrilateral mesh elements. The study domain corresponds to a cross section plane to the axis of the turbomachine containing the blades of the distributor. velocity fields and pressure for three angles of opening of the distributor were obtained. The boundary conditions applied were: a distribution of velocities at the entrance of the scroll, floating distribution at the exit pressure and a non-slip condition on the walls snail and distributor. The turbulence model used is known as Smagorinsky subgrid model used in the method of Large Eddy Simulation (LES).

Keywords: Kaplan turbine scroll, distributor, turbulent flow, finite element method, large eddy simulation

INTRODUCCIÓN

Las turbinas Kaplan son turbomáquinas motrices de reacción y de flujo predominantemente axial, con un rodete similar a las propelas de un barco y son utilizadas en el aprovechamiento de cauces de pequeña altura y caudales elevados. Su importancia reside en el diseño, ya que se

pueden regular los álabes del rodete y/o del distribuidor, para tener condiciones de óptimo rendimiento según la carga en demanda. Poseen un ducto llamado caracol (espiral, voluta, cámara de alimentación, caja o cámara espiral) que produce un cambio en la dirección rectilínea del flujo proveniente de la tubería forzada y transforma parte de la energía de presión que posee el flujo en energía cinética; este

contiene un dispositivo de regulación de caudal y potencia denominado distribuidor, el cual permite efectuar la parada de la turbomáquina, evita el embalamiento en casos de carga nula sobre el generador y adapta las componentes de la velocidad para suministrar el giro necesario al flujo en la entrada del rodete, gracias a que la sección de paso entre sus álabes directrices acelera el flujo y disminuye la presión manométrica hasta ser nula o negativa. Algunos caracoles pueden poseer una corona inmóvil que antecede al distribuidor (el pre-distribuidor) para adecuar la dirección del flujo antes de entrar al distribuidor.



Figura 1. Banco de pruebas de la turbina Kaplan. Laboratorio de Energética, Escuela de Ingeniería Mecánica, UCV

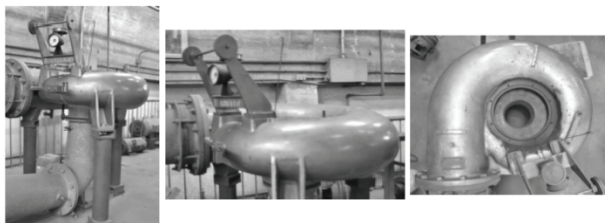


Figura 2. Diferentes tomas del banco de pruebas de la turbina Kaplan. Laboratorio de Energética, Escuela de Ingeniería Mecánica, UCV

En el Laboratorio de Energética de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela (UCV), se dispone de un banco para pruebas de modelos a escala reducida de turbinas hidráulicas tipo Kaplan. Con el propósito de diseñar y construir en el país modelos a escala reducida de este tipo de turbinas, se deben analizar adecuadamente los campos de velocidad y presión del flujo en el conjunto estator-rodete-tubo de aspiración, que permitan evaluar las características del flujo en el banco con la finalidad de establecer los criterios hidráulicos a fin de evaluar su eficiencia actual y, si es posible, establecer el

conjunto de mejoras para aumentar la eficiencia del banco y de los distintos modelos de rodetes a ser construidos. En las figuras: 1 y 2 se muestran fotografías del caracol y el banco de pruebas que se encuentran actualmente en el Laboratorio de Energética (UCV). En la figura 3 se muestra el distribuidor de flujo que posee dieciséis paletas simétricas móviles.

Trabajos previos donde es utilizada la teoría del flujo potencial y se aplican técnicas numéricas para la determinación del campo de velocidades con vorticidad nula, mediante la solución de la ecuación de Laplace, fueron realizados en la Universidad Central de Venezuela por: Chirico y Azuaje (1985) y Sansone (1993). En el trabajo de Fontan (1984), se construyó un modelo de rodete tipo Kaplan, adaptado a la geometría del banco de pruebas.

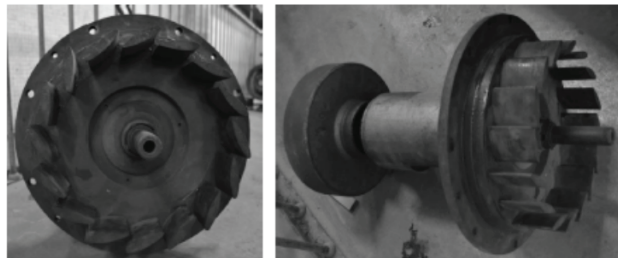


Figura 3. Distribuidor del caracol que contiene 16 álabes simétricos.

Con el propósito de tener un mejor detalle del flujo en relación a los trabajos previos, donde sean tomados en cuenta los efectos de la viscosidad y la turbulencia, se propuso resolver, en este trabajo, las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el método del elemento finito, el cual es el más adecuado para modelar dominios y condiciones de contorno de alta complejidad. Existe en la actualidad un código académico desarrollado por el profesor Eugenio Sansone en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV (Sansone, 2013), que puede brindar información muy detallada del comportamiento del flujo en las turbinas, con este se puede realizar el análisis del flujo turbulento en el caracol y distribuidor de la turbina hidráulica señalada. Continuando la línea de investigaciones previas realizadas en la Escuela de Ingeniería Mecánica (UCV), se llevó a cabo el análisis bidimensional del flujo turbulento en una sección plana del conjunto caracol-distribuidor. El estudio numérico emprendido usando las ecuaciones de Navier-Stokes, fue de tipo preliminar, tomando en cuenta las limitaciones computacionales que actualmente hay en el país, la complejidad de la geometría a ser estudiada y la limitación económica para el uso de licencias registradas de códigos existentes en el mercado que puedan ser usados

adecuadamente en el contexto de una institución académica. Posteriores estudios incluirán el análisis del rodete con flujos axisimétricos y la solución completa del campo de flujo tridimensional, mediante la utilización de códigos propios eficientes desarrollados totalmente en el país.

Para la medición de la geometría interna del caracol, fue construido un aparato de medición particular a base de dos verniers: corto y largo, al que se le denominó: “volutímetro”, (figura 4). El sistema de medición fue adaptado a presión en el agujero del caracol a fin de mantener fijo el aparato durante la medición de los radios vectores internos. El ajuste a 0° en la escala angular dispuesta sobre un papel, se realizó rotándola hasta hacer coincidir el radio vector a 0°, que resulta paralelo a la sección de entrada de la voluta. Los ángulos positivos se toman a partir de esta referencia, en sentido horario. Los detalles del montaje del volutímetro se pueden apreciar en la figura 5. En el trabajo de Moreno y Uribe (2014), se especifican los detalles del aparato de medición de la espiral, así como su montaje en el caracol. En las figuras: 8 y 9 se muestran los detalles de las geometrías digitalizadas del caracol y de uno de los álabes del distribuidor.

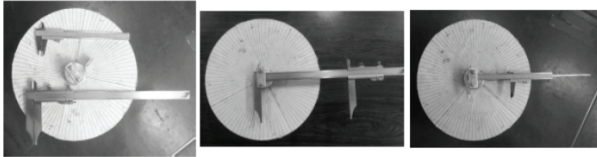


Figura 4. Construcción de un aparato de medidas (“volutímetro”) a base de verniers (corto y largo) para medir el interior de la voluta

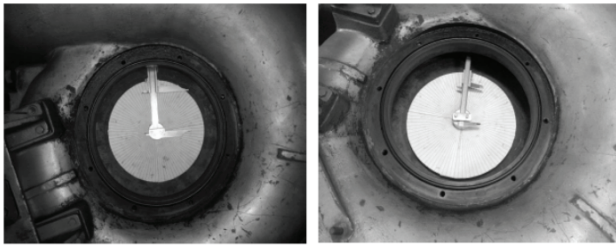


Figura 5. Disposición del volutímetro en el caracol sin distribuidor. Izquierda: vernier corto. Derecha: vernier largo

ECUACIONES DIFERENCIALES DEL FLUJO TURBULENTO

El campo de flujo turbulento incompresible es descrito mediante la solución numérica de las ecuaciones de continuidad y momentum en forma diferencial, filtradas espacialmente según la metodología denominada simulación

de grandes escalas (ecuaciones 1 y 2), donde las escalas de turbulencia con alta longitud de onda en el espacio de Fourier (dominio espectral), son resueltas directamente, mientras que las escalas de onda corta próximas a las escalas de difusión molecular, que no pueden ser resueltas por la malla, son simuladas por medio de un modelo de sub-malla o sub-rejilla.

$$\nabla \bar{u} = 0 \quad (1)$$

$$\partial_T \bar{u} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} + \nabla [v(\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) - \tau_{SG}] + g \quad (2)$$

En estas ecuaciones, la supra barra se utiliza para indicar componentes del flujo turbulento filtradas en el dominio espectral de la turbulencia, siendo consideradas solo las escalas por encima de la escala de Kolmogorov, que es la más pequeña. En la ecuación 2, el término: τ_{SG} , corresponde al tensor residual de sub-rejilla, asociado al intercambio de momentum entre la macro escala de turbulencia y la escala de sub-rejilla de orden Δx , siendo $\tau_{SG} = \mathbf{uu} - \mathbf{u} \mathbf{u}$; a su vez este tensor puede ser expresado en términos de la velocidad en la macro escala, de forma similar a lo establecido según la hipótesis de Boussinesq:

$$-\tau_{SG} = \nu_{SG} (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \quad (3)$$

Y la viscosidad turbulenta de sub-malla: ν_{SG} , es tratada mediante el modelo de Smagorinsky, (Smagorinsky, 1963)

$$\nu_{SG} = (C_s \Delta x)^2 |e| \quad (4)$$

Donde: $|e|$, es la norma euclidiana del tensor de la tasa de deformación filtrada, Δx es un valor característico asociado a la malla de cálculo y C_s , es el coeficiente de Smagorinsky. Generalmente, en muchos casos se emplea el valor: $C_s = 0,1$ y se aplica algún modelo de amortiguación de la turbulencia cercana a las zonas donde la velocidad del flujo tiende a cero debido a la proximidad a cuerpos sólidos fijos.

CONDICIONES DE CONTORNO Y ARRANQUE UTILIZADAS

Entrada del dominio

En la entrada del dominio se especificó una distribución de velocidades, con un perfil de velocidad u_x (condición de Dirichlet), similar a aquel que se obtiene según la ecuación de Blasius (1908), para tuberías lisas. El perfil propuesto para este trabajo fue de la siguiente forma:

$$\frac{u_x}{u_\infty} = m \left[\left(\frac{m+1}{m} \right) \left(\frac{y}{R} \right)^{\left(\frac{1}{m+1} \right)} - \left(\frac{y}{R} \right)^{\left(\frac{1}{m} \right)} \right] \quad (5)$$

A diferencia del perfil de Blasius que, según (Potter, Wiggert, Ramadan, y Shih, 2012), es de la forma:

$$\frac{u_x}{u_\infty} = \left(\frac{y}{R} \right)^{\left(\frac{1}{n} \right)} \quad (6)$$

El perfil de velocidad de la ecuación 5, presenta la derivada nula de la velocidad en el centro de la sección circular del tubo:

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{u_x}{u_\infty} \right)_{y=R} \quad (7)$$

Este fue el criterio utilizado para establecer la ecuación matemática del perfil. El valor del coeficiente m , es ajustado de forma tal que las curvas producidas según las ecuaciones: 5 y 6, sean similares, sobre todo cerca de la pared. La figura 6 muestra la comparación entre las curvas, (según las ecuaciones: 5 y 6), para un valor de velocidad u_∞ arbitrario.

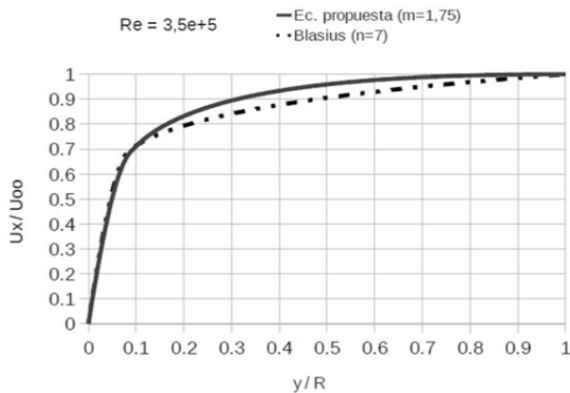


Figura 6. Comparación de los perfiles de velocidades.

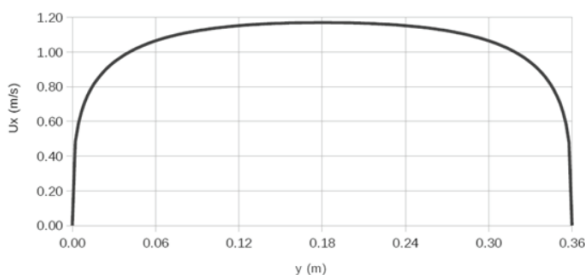


Figura 7. Perfil de velocidad en la sección de entrada

El valor determinado del parámetro m , en la ecuación 5 fue: $m=1,75$. El valor del parámetro n , en la ecuación 6 fue escogido de acuerdo al valor del número de Reynolds, Re_D , del flujo en la entrada del dominio basado en el diámetro interno del tubo: D . Para el caudal establecido: $V=0,1m^3/s$, se tiene que: $Re_D=3,5x10^5$ y según la tabla 7.1 de (Potter *et al* 2012), $n=7$. Una vez ajustado el valor del parámetro m , se ajusta el valor de velocidad u_∞ , en la ecuación 5 conforme al caudal. Para ello se realiza la integración del perfil de velocidades al considerar flujo axisimétrico en la entrada del caracol, y se obtiene:

$$u_\infty = \frac{v}{2\pi R^2 \alpha} \quad (8)$$

Donde el parámetro α , es de la forma:

$$\alpha = \frac{(m+1)^2}{(m+2)} - \frac{(m+1)^2}{(2m+3)} - \frac{m^2}{(m+1)} + \frac{m^2}{(2m+1)} \quad (9)$$

Los valores obtenidos fueron: $\alpha=0,4201$ y $u_\infty=1,17m/s$. La figura 7 muestra el perfil de velocidades aplicado en la entrada del caracol según la ecuación 5, con los ajustes aplicados.

La componente transversal de la velocidad: u_y , se dejó libre en la entrada y forma parte de las incógnitas a resolver. Esta condición suaviza el comportamiento de la distribución de presión en la entrada del caracol y reduce la concentración de la misma en las esquinas comprendidas entre la pared del caracol y la arista de entrada.

Salida del dominio

Corresponde a la sección circular de diámetro: $115mm$, previa al inicio de la curvatura del canal del ojo del rodete; aquí el campo de velocidades y la presión son variables. En general, especificar la presión en la salida del dominio es una buena condición para simular y resolver el flujo incompresible con técnicas de *CFD*, por eso se impuso una distribución de presión, en este caso, variable o flotante (condición de Dirichlet) que se ajusta conforme al campo de velocidades obtenido en la salida del caracol con cada iteración. La ecuación para calcular la presión fue obtenida a partir de la ecuación de la energía, considerando como volumen de control el conjunto caracol-distribuidor con una entrada: "e" y una salida: "s" del flujo. Al considerar uniforme el estado termodinámico del flujo en dichas secciones, se tiene:

$$p_s = p_s + \frac{1}{2}(u_e^2 - u_s^2) - \rho(e_s - e_e) \quad (10)$$

En la entrada se especifican los valores de presión media, energía cinética específica media y energía interna específica media, que son denotados con el símbolo supra tilde; al considerar flujo isotérmico se desprecia el último término de la expresión el cual depende de la temperatura, que permite calcular la caída de presión por acción viscosa, asociada a la pérdida de carga total del flujo en el caracol. Esta ecuación se aplica nodo a nodo en la salida del dominio. Como el caudal es constante durante el cálculo para un ángulo de apertura determinado en el distribuidor, la diferencia de presión entre la entrada y la salida del caracol es prácticamente invariante e independiente del valor elegido para la presión de referencia (al ser la pérdida de carga total función del caudal, la rugosidad relativa y del número de Re_D). Por lo tanto, se puede utilizar un valor arbitrario para esta presión y se podría incluso calcular solo la distribución de la presión relativa: $p_s - p_e$, en todo el caracol. Esta condición de presión flotante a la salida, produjo un buen comportamiento numérico y se apreció que el flujo de masa neto satisfizo la ecuación de continuidad.

Fronteras sólidas

Las fronteras sólidas del dominio son las zonas del contorno en contacto con el fluido, constituidas por la superficie interna del caracol y los dieciséis perfiles del distribuidor. Aquí, se impuso la condición de no deslizamiento (velocidad cero) para el flujo turbulento (condición de Dirichlet).

Cabe destacar que, cuando la pared es una superficie porosa o permeable, la componente normal a la superficie es distinta de cero y la componente tangencial es nula si no ocurre deslizamiento.

Condiciones de arranque

Las condiciones de arranque consisten en establecer los valores de las incógnitas antes de iniciar el cálculo iterativo y no necesariamente satisfacen las ecuaciones aplicadas. En los tres casos considerados se impuso una condición de arranque constituida por un campo de velocidades nulo en todo el caracol y una presión uniforme igual al valor de la presión de referencia establecido en la arista de entrada del caracol.

METODOLOGÍA Y PROGRAMAS UTILIZADOS

Código de cálculo principal

En este trabajo fue utilizado para la solución del sistema de ecuaciones y para el post procesamiento de la solución obtenida, el código académico desarrollado en su totalidad por el profesor Eugenio Sansone, escrito en lenguaje C, que emplea el método del elemento finito para resolver de forma discreta las ecuaciones de continuidad (Navier-Stokes), y energía en forma diferencial, que rigen el flujo turbulento de un fluido newtoniano en geometrías 2D y 3D y donde la turbulencia de las escalas pequeñas es resuelta según el modelo de Smagorinsky. El código permite la aplicación de dos procedimientos para obtener la solución: el primero consiste en una técnica más o menos implícita en el tiempo, en la cual las ecuaciones se resuelven de forma simultánea en cada paso de tiempo. El segundo consiste en una técnica totalmente explícita en tiempo, aquí las ecuaciones son resueltas separadamente y en forma secuencial, en lo que se denomina un paso de tiempo fraccionado; este último ofrece una ganancia de tiempo de cálculo y es por lo menos de segundo orden de precisión, por lo que es más preciso, según *Zienkiewicz, Taylor & Nithiarasu (2005)* que el primer procedimiento. La solución del sistema de ecuaciones es directa mediante un proceso de factorización que se realiza en dos etapas, en lo que se conoce como una técnica de condensación matricial, según (Huebner, Dewhirst, Smith y Bayron, 2001). En la primera etapa, cada bloque se reduce de forma independiente para eliminar las incógnitas en los nodos internos. Esta fase se resuelve por completo de forma paralela a través de los núcleos del procesador del CPU del computador, asignando de forma simultánea un número determinado de bloques a cada núcleo. Es un proceso muy rápido y eficiente que utiliza las directivas de paralelización OPENMP de C++. En la segunda etapa los bloques reducidos se ensamblan en una matriz global que permite eliminar las incógnitas existentes solo en las fronteras de cada bloque, y la compatibilidad de las variables entre dos bloques cualquiera se asegura con la aplicación de una técnica basada en los multiplicadores de Lagrange; en esta fase se desarrolló un procedimiento de paralelización vía CPU, en el que la matriz global se subdivide de forma conveniente de acuerdo al número de núcleos presentes en el CPU.

Programas utilizados en la digitalización del dominio

El dominio de estudio (caracol y distribuidor) se definió al digitalizar los planos de la turbomáquina en el programa AutoCAD con curvas de Bézier de la herramienta *Spline Fit* (figuras: 8 y 9). Para las tres configuraciones del distribuidor, la estructura y disposición de los bloques

en el dominio se realizó con el programa Rhinoceros. La generación de las mallas (preproceso) se realizó en el programa GiD, desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), de la Universidad Politécnica de Cataluña, España.

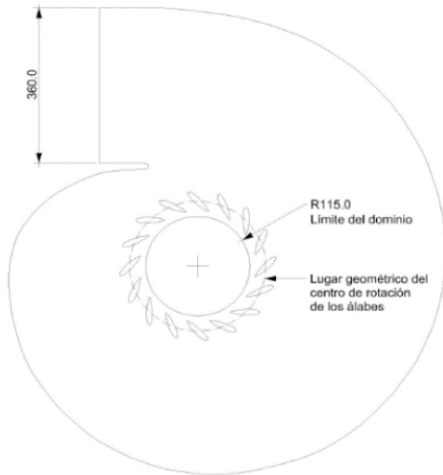


Figura 8. Geometría digitalizada del plano de estudio

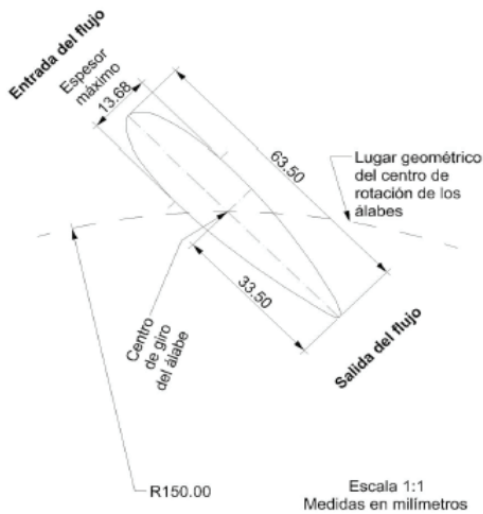


Figura 9. Dimensiones de un álabes del distribuidor de flujo

Discretización del dominio

En los tres casos, la discretización se realizó mediante una malla multibloques. A nivel macro, la topología de los bloques es no estructurada, mientras que en el interior de cada bloque es estructurada; la unión de estos genera una malla multibloque conforme en todo el dominio. La elección de esta técnica estuvo supeditada al código académico principal, con la finalidad de realizar el cálculo en paralelo, refinar con detalle las zonas de interés, obtener mayor precisión en los resultados y reducir el tiempo de

cálculo. Para la malla generada se utilizaron elementos finitos cuadrilaterales bi-cuadráticos de ocho nodos en formulación isoparamétrica sin nodos internos.

Construcción de la malla de cálculo

Se inició con la disposición de los bloques en el distribuidor, y a partir de ellos se configuraron los bloques del caracol. Los bloques del distribuidor tendrían mayor concentración de elementos por ser la zona con efectos fluidos dinámicos de mayor interés. La forma de los bloques estuvo determinada por la disposición de sus aristas con ángulos formados entre ellas mayores a: 45° y menores a: 135° , la calidad de la forma fue superior a: $0,143$ ($1/7$) y todos los jacobianos calculados, positivos, lo cual es importante ya que las áreas transformadas deben ser siempre positivas durante el proceso de integración numérica que se sigue para cada elemento finito en base a un elemento de referencia.

Ajuste de los datos del generador de malla al código académico

El archivo de salida del GiD solo presentaba las coordenadas y numeración de los nodos y la topología de los elementos (no de los bloques), por lo cual se elaboró un archivo con las especificaciones requeridas por el código académico: numeración y coordenadas de los nodos, topología de los elementos, topología de los bloques, número de divisiones de cada uno de estos y las condiciones de contorno, de acuerdo a un código de orientación y otro de numeración dependiente del tipo de contorno. Para el cálculo en paralelo, se re-enumeraron los nodos compartidos ubicados en las aristas distribuidas entre bloques, para que estos fueran totalmente independientes, lo cual se hizo de forma automática en el programa de cálculo principal desarrollado por el profesor Sansone. En la figura 10, se muestra la colocación de bloques para cada uno de los casos estudiados, con aperturas del distribuidor de 30° , 45° y 60° (izquierda a derecha). En la figura 11, se muestran las mallas conseguidas con el programa GiD y posteriormente transformadas a mallas por bloques en el programa de cálculo principal.

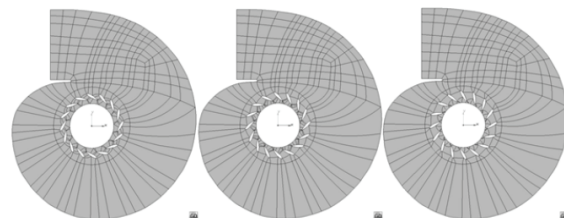


Figura 10. Distribución de bloques en el dominio de estudio, tres casos: aperturas de 30° , 45° , 60°

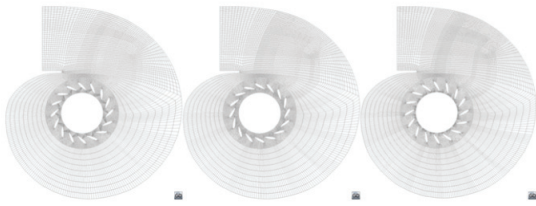


Figura 11. Mallas generadas para tres casos de estudio: aperturas de 30°, 45° y 60°

ANÁLISIS DE RESULTADOS. ESTUDIO DE LA VELOCIDAD Y LA PRESIÓN

La unión de las secciones inicial y final del caracol forman una extensión sólida del mismo llamada lengüeta. En la turbomáquina estudiada la lengüeta y el distribuidor están muy separados, lo cual permite la desviación de una parte del flujo principal por ese espacio (flujo secundario). Este último circula en sentido contrario al principal y desacelera por efecto de la geometría hasta confluir con el flujo principal para ángulos comprendidos entre: 235° y 240° del caracol. Esta situación se evidenció en los 3 casos (figura 12) y ocasionó una disipación de energía muy alta. El flujo resultante que entra al distribuidor no presenta un incremento considerable en su velocidad para las zonas comprendidas entre los ángulos señalados (entra por el efecto de la continuidad). La separación entre la lengüeta y el distribuidor evita que el caracol proporcione una distribución adecuada del flujo a lo largo del distribuidor, esta explicación coincide con la de (Chen, Lee y Huang, 1986).

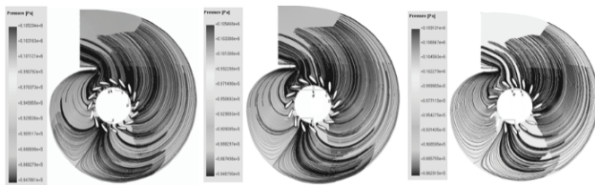


Figura 12. Líneas de corrientes y presión en el caracol para 30°, 45° y 60°, respectivamente

En las figuras: 13, 14 y 15 se presentan detalles de los vórtices generados para las tres configuraciones en diferentes zonas del distribuidor, con prominencia en las áreas comprendidas entre: 45° a 120° del caracol.

En las figuras: 16 y 17 se aprecia que la velocidad normal es mayor a la velocidad tangencial en la salida del dominio, lo cual corresponde a lo que plantean: (Hamed, Abdallah,

Tabakoff, 1977) y (Hamed, Baskharone y Tabakoff, 1978). Por su parte, (Abidat, Hamidow Hachemi y Hamel, 2006), establecen que la magnitud de la velocidad aumenta a medida que el flujo recorre el caracol; en los casos estudiados no ocurre debido a la separación del flujo en la lengüeta y a los efectos de desviación que se presentan en las líneas de corriente en la salida del distribuidor (figuras: 18 a 24), donde se detallan los vórtices, líneas de corrientes y presiones en diferentes zonas cercanas a la salida del dominio, para: 30° (izquierda), 45° (centro) y 60° (derecha) de apertura del distribuidor, respectivamente.

En todos los casos se presenta la formación de vórtices en la salida del distribuidor (velocidades tangenciales negativas, figura 17). La configuración que presenta los vórtices más intensos y con mayor separación de la salida del dominio, es aquella con ángulo de apertura en el distribuidor a: 30° (más cerrada); en la configuración de 60°, los vórtices son más débiles, pero están más cercanos a la salida del dominio y produce la regresión del flujo (velocidades normales negativas, figura 16). Se debe notar que mientras más cerrado esté el distribuidor, el flujo se adapta en menor medida a la dirección que le ofrecen los canales. La figura 25 refleja la variación del ángulo de salida del vector velocidad (variación de la velocidad tangencial), y la figura 26 muestra la distribución del módulo de la velocidad, siendo mayor en la zona comprendida entre: 45° y 135°, de la circunferencia de salida. La figura 27 muestra una comparación de la energía cinética en el dominio para las tres configuraciones del distribuidor. En los tres casos se aprecia cómo la lengüeta produce en el flujo una absorción importante de la energía de presión (figura 28), transformándola en energía cinética y esto redunda en un bajo rendimiento del conjunto caracol-distribuidor.

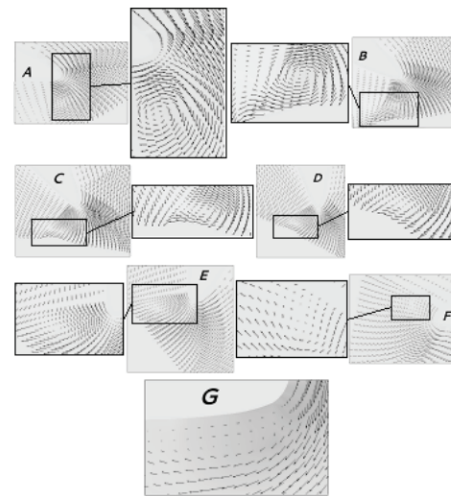


Figura 13. Campo de velocidades para distribuidor a 30°. Interés: E (45°), C (90°-120°), B (120°), H (lengüeta)

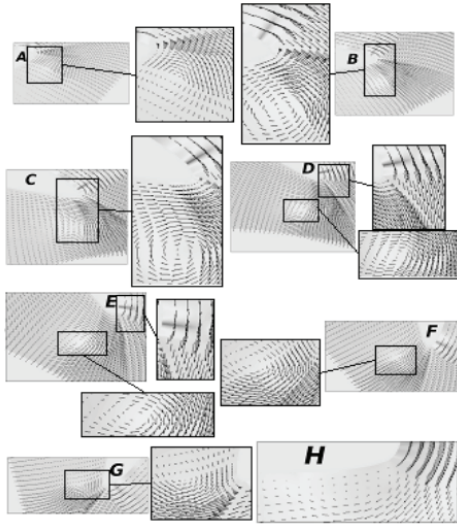


Figura 14. Campo de velocidad para 45°
 Interés: E (45°-60°), D (0°-90°), C (90-120°), H (lengüeta)

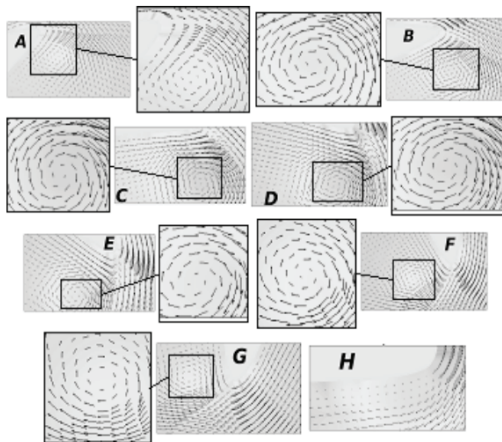


Figura 15. Campo de velocidad para 60°
 Interés: C (60°), B (90°-120°), A (120°-135°), G (lengüeta)

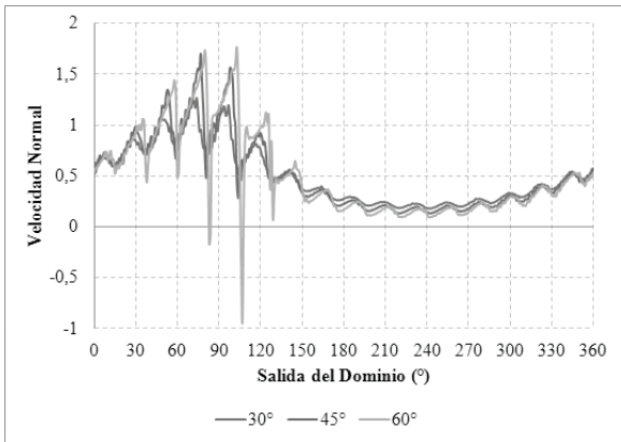


Figura 16. Distribución de la velocidad normal a la salida del caracol

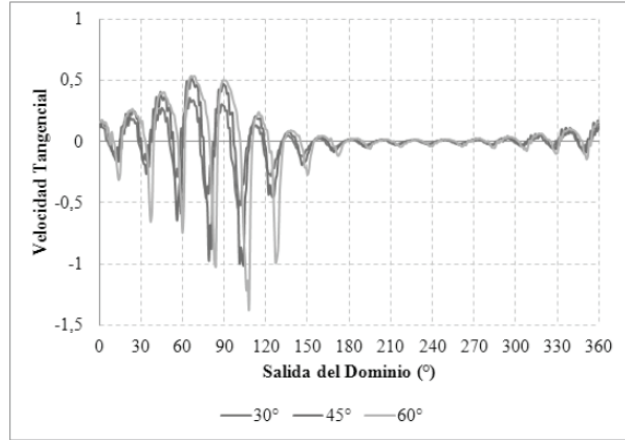


Figura 17. Distribución de la velocidad tangencial a la salida del caracol

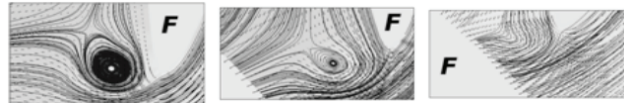


Figura 18. Zona 1 (0°-45°), aperturas: 30°, 45°, 60°

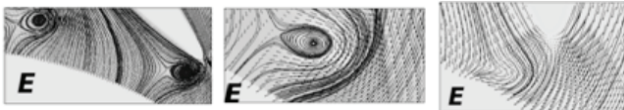


Figura 19. Zona 2 (45°-60°), aperturas: 30°, 45°, 60°



Figura 20. Zona 3 (60°-90°), aperturas: 30°, 45°, 60°

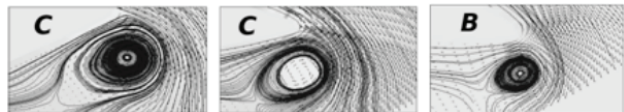


Figura 21. Zona 4 (120°-135°), aperturas: 30°, 45°, 60°



Figura 22. Zona 5 (240°-270°), aperturas: 30°, 45°, 60°

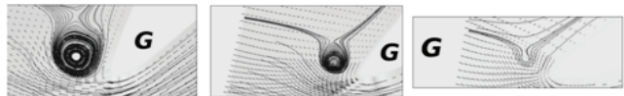


Figura 23. Zona 6 (330°-360°), aperturas: 30°, 45°, 60°

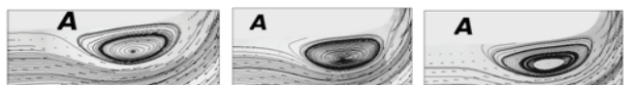


Figura 24. Zona de la lengüeta, aperturas: 30°, 45° y 60°

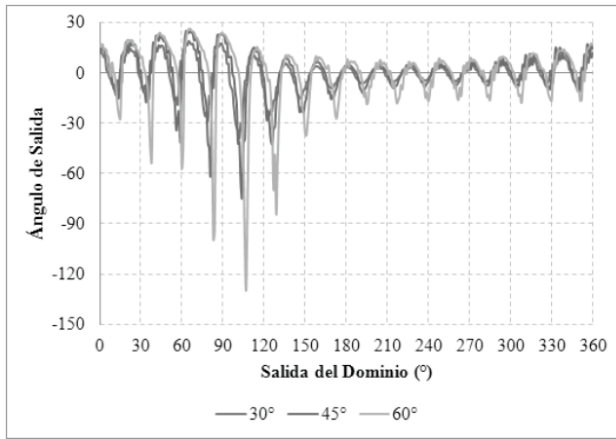


Figura 25. Ángulo de la velocidad a la salida del caracol

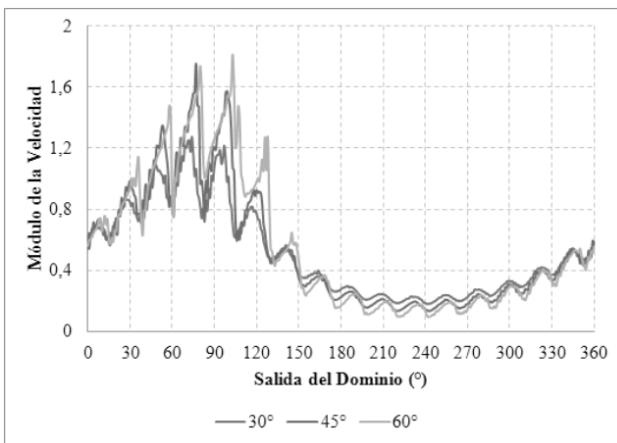


Figura 26. Módulo de la velocidad a la salida del caracol

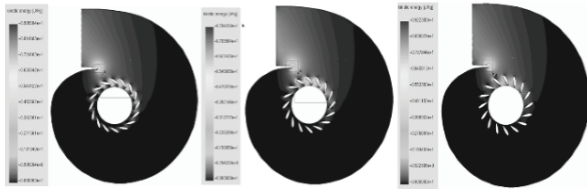


Figura 27. Energía cinética para las configuraciones de 30°, 45° y 60°, respectivamente

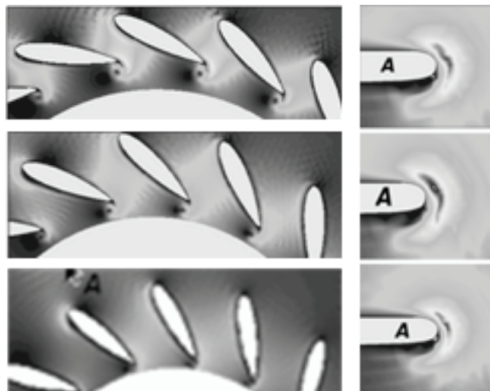


Figura 28. Detalle de la energía cinética para 30°, 45° y 60° (de arriba a abajo)

Para estudiar la caída de presión se utiliza el coeficiente de presión C_p , relacionado a la diferencia entre la presión de salida y la de referencia en la entrada. La baja de presión irá aumentando cuando la energía de presión del flujo experimente una mayor transformación en energía cinética (se acelera), y ocurre a medida que los canales del distribuidor están más cerrados; esto concuerda con lo establecido por Vu y Shyy (1988) y (Abidat *et al.* 2006), quienes explican que ocurre una caída de presión del flujo en el distribuidor a medida que el mismo se acelera. La figura 29 muestra la variación del coeficiente de presión C_p , respecto a la circunferencia de salida del dominio.

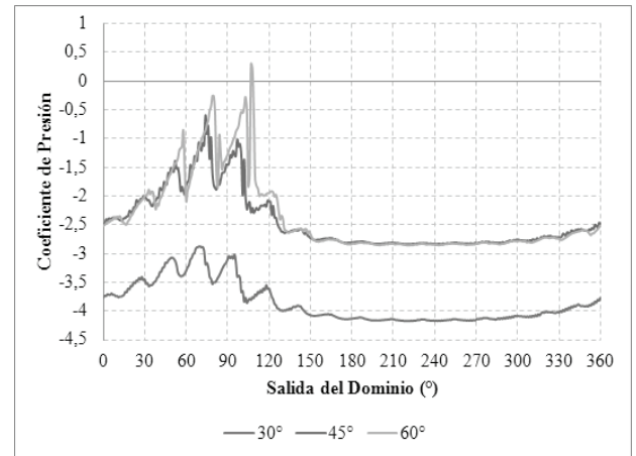


Figura 29. Coeficiente de presión a la salida

CÁLCULO DEL ERROR

Se utilizó la Norma L_2 del error relativo entre dos pasos de tiempo consecutivos para el cálculo del error asociado a cualquier variable del flujo, ϕ_p , definida por (Zienkiewicz *et al.*, 2005) como:

$$Error_{relativo} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [\phi_i^{(t+1)} - \phi_i^{(t)}]^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [\phi_i^{(t+1)}]^2}} \quad (11)$$

Donde N , es el número total de nodos de la malla. En las figuras: 30, 31 y 32 se muestra la norma del error para la presión y las velocidades en sus componentes cartesianas: x e y , respecto a cada paso de tiempo, apreciándose el descenso del error durante las iteraciones.

En este trabajo no se hicieron estudios comparativos de los resultados obtenidos con otras investigaciones similares, ya que el caracol estudiado es un prototipo existente sobre el que no existen análisis numéricos previos que involucren

el uso de técnicas de dinámica de fluidos computacional para flujo turbulento. En ese sentido, el presente constituye un primer trabajo donde son resueltas las ecuaciones de Navier-Stokes en un plano de flujo que contiene la sección transversal del distribuidor y la lengüeta. Debido a la complejidad de la geometría estudiada y el empleo de mallas multibloques conformes, el refinamiento de la malla, sobre todo, hacia la zona del distribuidor, no es tan sencillo de lograr como lo es en el caso del uso de mallas multibloques no conformes, que permitiría hacer un mejor refinamiento de aquellos bloques dispuestos solo en el distribuidor del caracol, sin alterar el resto de la malla, pero que presentan los problemas de la interpolación numérica y el adecuado tratamiento de las condiciones de compatibilidad del flujo en las fronteras compartidas por uno o más bloques. El empleo de mallas multibloques no conformes para refinar adecuadamente hacia la zona del distribuidor, pudiera ser objeto de un estudio posterior a esta investigación preliminar.

CONCLUSIONES

Se realizó el cálculo del campo de velocidades y presiones a: 30° , 45° y 60° , de apertura del distribuidor, en tres dominios discretizados con mallas estructuradas por bloques (multibloques) con elementos cuadrilaterales bicuadráticos de ocho nodos en formulación isoparamétrica sin nodos internos, mediante un código académico desarrollado por el profesor Eugenio Sansone en la UCV, con tiempos de cálculo entre: 8000 y 9500 pasos de tiempo.

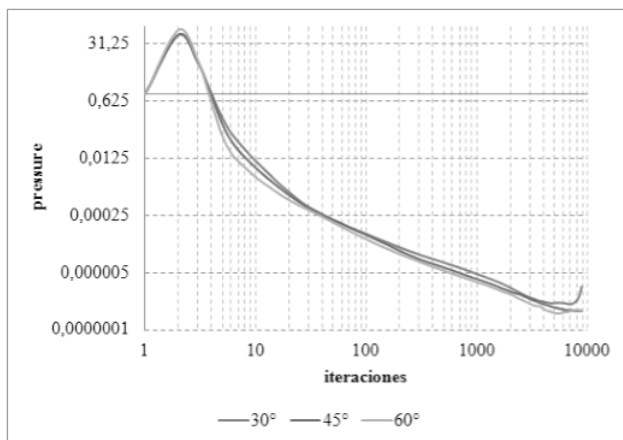


Figura 30. Error de la presión

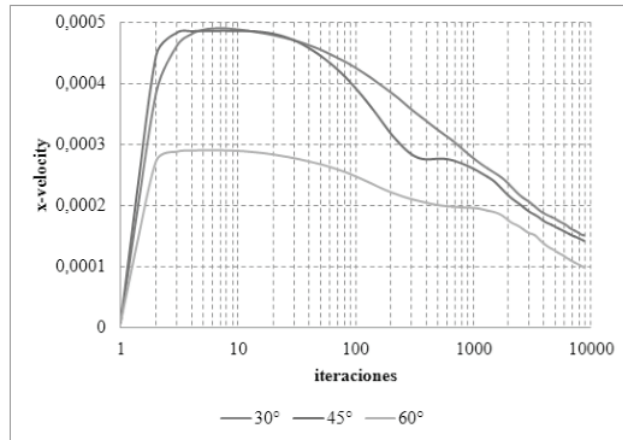


Figura 31. Error de la velocidad en x

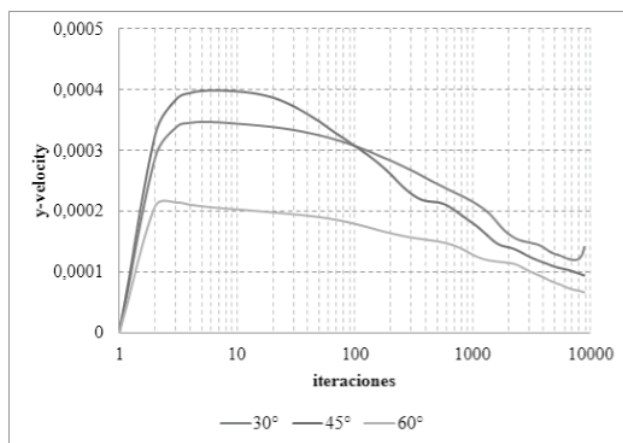


Figura 32. Error de la velocidad en y

Se ofrecieron aportes importantes con el propósito de simular numéricamente el comportamiento real del fluido en el dominio de estudio: el perfil de Blasius modificado aplicado al flujo en la entrada, la adjudicación automática de las condiciones de no deslizamiento en las paredes, y la ecuación de caída de presión obtenida a partir de la ecuación de la energía.

La falta de información después de la circunferencia de salida no permitió apreciar convenientemente el tránsito de vórtices generados desde la salida del distribuidor. De ser extendido el dominio de estudio a la salida (en un cálculo 3D), se pudieran obtener mejores resultados en la salida con la posibilidad de establecer un patrón periódico de formación de vórtices.

Se verificó que el diseño del caracol no es el adecuado para la turbomáquina, debido a la gran separación existente entre la lengüeta y el distribuidor. En todos los casos hubo separación del flujo en la lengüeta que puede producir un bajo rendimiento de la turbina debido al campo de velocidades desordenado en la salida del distribuidor.

La configuración de 30° de apertura del distribuidor es ineficiente debido a que los álabes actúan como obstáculos y no dirigen el flujo, en cambio para las aperturas de: 45° y 60° la dirección de la corriente ocurre de mejor manera. En todos los casos se presentó la formación de vórtices, lo que ocasiona disipación de energía cinética y direcciones no deseadas de la velocidad del flujo en la salida del dominio. El distribuidor actúa como elemento eficiente al incrementar la energía cinética del fluido mientras disminuye el ángulo de apertura.

El diseño apropiado del conjunto caracol–distribuidor es clave para acelerar y distribuir el flujo de forma uniforme. A diferencia de los estudios realizados por: (Hamed *et al.* 1977), (Hamed *et al.* 1978), (Chen *et al.* 1986), (Oliveira. Moura, Brasil, 2013) y (Balint, Susan, Muntean y Anton, 2004), el fluido no aceleró al transcurrir por la voluta en caso alguno; presentó una disipación de energía cinética fuerte debido a las variaciones de la magnitud y dirección de la velocidad en la salida del distribuidor, con valores muy altos en la zona de descarga del flujo principal sobre el distribuidor y casi inexistentes en la zona donde ocurre la confluencia de las corrientes separadas por la lengüeta.

RECOMENDACIONES

Incluir una extensión de la lengüeta hasta el álabe del distribuidor cercano a: 70° , de la circunferencia de salida del dominio. Esto podría evitar la separación del flujo en la lengüeta y mejorar la transformación de energía cinética a través del caracol y de los álabes directrices. Se podría añadir un pre-distribuidor como el que poseen las cajas espirales de hormigón de sección cuadrada (figura 33).

Realizar estudios posteriores con mallas multibloques compuestas por bloques no conformes, de manera que se puedan afinar zonas de interés en el dominio de estudio sin afectar la concentración de elementos en los bloques cercanos o contiguos a estas zonas, por ejemplo, tener alta densidad de elementos en el distribuidor y mucho menor en el resto del caracol.

Realizar un estudio tridimensional de la turbomáquina completa que incluya el rodete y el tubo de aspiración, para verificar la funcionalidad de los otros componentes y el comportamiento total del flujo considerando la aceleración de gravedad y obtener datos de mayor validez.

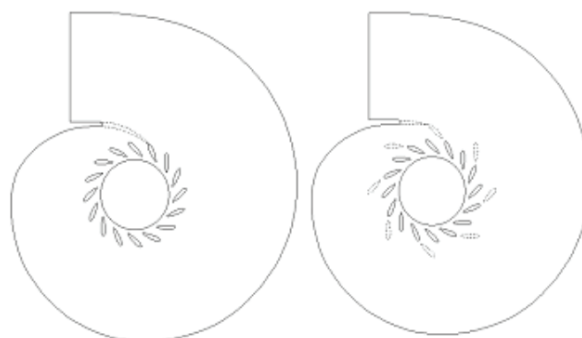


Figura 33. Recomendaciones para el re-diseño del caracol. 1 Extensión de lengüeta (izquierda), 2 pre-distribuidor de álabes fijos (derecha)

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico CDCH, organismo que financió el proyecto de investigación **PG08-8290-2011-1**, que sirvió para la compra de dos servidores tipo HP Prolant con procesadores I7, sobre el cual se realizaron los cálculos en paralelo que se presentaron en este trabajo.

REFERENCIAS

- ABIDAT, M., HAMIDOU, M. K., HACHEMI, M., & HAMEL, M. (2006, September). Design and flow analysis of radial and mixed flow turbine volutes. In *ECCOMAS CFD Proceedings of the European Conference on Computational Fluid Dynamics, Egmond aan Zee, The Netherlands, September 5-8, 2006*. Delft University of Technology; European Community on Computational Methods in Applied Sciences (ECCOMAS). <http://proceedings.fyper.com/eccomas CFD 2006/documents/61.pdf>
- BALINT, D., SUSAN, R., MUNTEAN, S., & ANTON, I. (2004, October). A numerical investigation of the full 3D turbulent flow in Kaplan hydraulic turbines. In *The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisoara, Romania*. http://mmut.mec.upt.ro/mh/conferinta_mh/201_balint.pdf
- BLASIUS, H., (1908), *Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung*, *Z. Angew. Math Phys*, (56): 1-37.
- CHEN, S., LEE, S., HUANG, Y., (1986), *A mathematical model for the analysis of fluid flow in a scroll*, *ASME, Journal of Fluids Engineering*, (108): 6-11.

- CHIRICO, G., AZUAJE, M., (1985), *Construcción y pruebas de un modelo de turbina hidráulica axial de geometría variable (kaplan)*. (Trabajo especial de grado). Universidad Central de Venezuela. Caracas-Venezuela.
- FONTAN, J., (1984), *Diseño y construcción del modelo en madera de un rotor de turbina Kaplan*. (Trabajo especial de grado). Universidad Central de Venezuela. Caracas-Venezuela.
- HAMED, A., ABDALLAH, S., TABAKOFF, W., (1977), *Flow study in the cross sectional planes of a turbine scroll*, AIAA, No. 77-714, 10th Fluid and Plasmadynamics Conference, Albuquerque, Nuevo México.
- HAMED, A., BASKHARONE, E., TABAKOFF, W., (1978), *A flow study in radial inflow turbine scroll-nozzle assembly*, ASME, *Journal of Fluid Engineering*, (100): 31-36.
- HUEBNER, K. H., DEWHIRST, D.L., SMITH, D.E., BYROM, T.G., (2001), *The Finite Element Method for Engineers*, 4th edition, John Wiley & Sons.
- MORENO, L.R., URIBE, R. P., (2014), *Análisis del flujo turbulento bidimensional en el conjunto caracol-distribuidor de una turbina hidráulica, mediante el método del elemento finito*. (Trabajo especial de grado). Universidad Central de Venezuela. Caracas-Venezuela.
- OLIVEIRA, L., MOURA, M., BRASIL, A., (2013), *Assessment of turbulence modelling for CFD simulations into hydroturbines spiral casings*. Universidad de Brasilia. Departamento de Engenharia Mecânica-Pos-Graduação Laboratório de Energia e Ambiente-LEA, http://www.tfd.chalmers.se/~hani/postscript_files/CaisaEspir2.pdf.
- POTTER, M. C., WIGGERT, D. C., RAMADAN, B., SHIH, T., (2012), *Mechanics of Fluids*, 4th edition, Cengage Learning.
- SANSONE, E. (1993), *Análisis del flujo en el estator de una turbina hidráulica aplicando el método del elemento finito*. (Trabajo especial de grado). Universidad Central de Venezuela. Caracas-Venezuela.
- SANSONE, E. , (2013), *Solución numérica de las ecuaciones del flujo turbulento basada en trayectorias características mediante el método del elemento finito. Parte 1: mallas multibloques estructuradas*. Revista de la Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, Septiembre, 28(2): 87-100.
- SMAGORINSKY, J., (1963), *General circulation experiments with the primitive equations*, Mon. Weath. Rev. **91**(3), 99-164.
- VU, T.C, SHYY, W., (1988), *Navier Stokes computation of radial inflow turbine distributor*. ASME, *Journal of Fluid Engineering*, (110):29-32.
- ZIENKIEWICZ, O.C., TAYLOR, R.L., NITHIARASU, P., (2005), *The Finite Element Method for Fluid Dynamics*, 6th edition, Elsevier Butterworth Heinemann.