# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

# DESARROLLO Y ESTUDIO DE UN MALLADO ESTRUCTURADO OPTIMIZADO PARA UNA TURBINA TIPO FRANCIS CON VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN DISEÑO Y SIMULACIÓN**

**GUASCAL SANGUÑA EDISON JAVIER**
**edison.guascal@epn.edu.ec**

**QUISPE QUISPE PEDRO ALEXANDER**
**pedro.quispe@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Ing. VÍCTOR HUGO HIDALGO DÍAZ, D.Sc.**
**victor.hidalgo@epn.edu.ec**

**Quito, Agosto 2019**

# CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores **EDISON JAVIER GUASCAL SANGUÑA** Y **PEDRO ALEXANDER QUISPE QUISPE**, bajo mi supervisión.

_____

Ing. Víctor Hugo Hidalgo, D.Sc.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

_____

Ing. Esteban Alejandro Valencia, Ph.D.

**CODIRECTOR DE PROYECTO**

# DECLARACIÓN

Yo, **Edison Javier Guascal Sanguña** y **Pedro Alexander Quispe Quispe**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Edison Javier Guascal Sanguña

Pedro Alexander Quispe Quispe

# DEDICATORIA

A mi familia por su apoyo incondicional siempre, a mi esposa por su exigencia y amor incondicional.
A mi hijo Sebastián por ser la razón de alcanzar mis metas.

Alexander

A mi familia

Edison

# AGRADECIMIENTO

A la Escuela Politécnica Nacional por la valiosa formación profesional, de manera especial al Dr. Víctor Hidalgo por su apoyo, tiempo, conocimiento y experiencia al dirigir la presente tesis, y al Dr. Esteban Valencia por su colaboración y guía.
A nuestras familiares, amigos y a Dios por la fortaleza necesaria para seguir.

Edison y Alexander

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN ..... 1
Pregunta de Investigación ..... 2
Objetivo general ..... 2
Objetivos específicos ..... 2
1. MARCO TEÓRICO ..... 3
1.1. Mallado estructurado ..... 3
1.2. Topología de mallado ..... 4
1.3. Capa límite ..... 4
1.4. Estrategia bloques múltiples ..... 5
2. METODOLOGÍA ..... 9
2.1. Procedimiento ..... 9
2.2. Simplificación de geometría ..... 10
2.3. Dominio computacional ..... 12
2.3.1 Archivo de importación ..... 10
2.4. Estrategia de multibloques ..... 13
2.5. Condiciones de borde y frontera ..... 17
2.6. Condiciones de simulación en estado estable ..... 17
2.7. Condiciones de simulación en estado inestable ..... 19
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... 21
3.1. Optimización de mallado ..... 21
3.2. Simulación computacional ..... 23
3.2.1. Resultados de la simulación en estado estable ..... 23
3.2.2. Resultados de la simulación en estado inestable ..... 29
3.3. Validación experimental ..... 34
3.3.1. Eficiencia a través de expresiones (CFD POST) ..... 34
3.3.2. Porcentaje de error en la simulación ..... 36
4. CONCLUSIONES ..... **¡Error! Marcador no definido.**
4.1. Recomendaciones y Trabajos futuros ..... 39
Referencias Bibliográficas ..... 40
Anexos ..... 43
Anexo I. Metodología de mallado de la caja espiral. ..... 44
Anexo II. Metodología de mallado de los álabes directrices. ..... 48
Anexo III. Metodología de mallado del rodete. ..... 50

Anexo IV. Metodología de mallado del tubo de descarga. .....54
Anexo V. Datos generales de la turbina de la Central San Francisco. .....56
Anexo VI. Resultado del estudio de (Christian Mora, 2018) para comparación. .....57
Anexo VII. Resultado del estudio de (Christian Mora, 2018) para comparación. .....58
Anexo VIII. Configuración numérica de (Huamaní & Braga, 2018) para comparación. .....59
Anexo IX. Resultado del estudio de (Christian Mora, 2018) para comparación. .....60
Anexo X. Expresiones en ANSYS CFX en estado estable e inestable. .....62
Anexo XI. Resultado del estudio de (Christian Mora, 2018) para comparación. .....63

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Una malla rectangular uniforme…….. 3
Figura 1.2. (a) Generación de una malla tipo H grid para el cálculo de flujo en un segmento de simetría. (b) Generación de una malla tipo O grid para un cilindro circular …… 4
Figura 1.3. Tipos generales de capas límites…….. 5
Figura 1.4. Representación multibloque para malla C-H alrededor de un perfil del ala de un avión…….. 5
Figura 2.1. Metodología utilizada para la generación de mallado estructurado…… 9
Figura 2.2. Dominios de la turbina Francis …….. 11
Figura 2.3. Simplificación geométrica del rodete…… 12
Figura 2.4. División en multibloques …….. 13
Figura 2.5. Asociación entre bordes y curvas…….. 13
Figura 2.6. Visualización de histogramas de calidad de mallado……..... 14
Figura 2.7. Evolución de bloques y pre-mallado de la caja espiral …… 15
Figura 2.8. Evolución de bloques y pre-mallado de los álabes directrices…… 15
Figura 2.9. Evolución de bloques y pre-mallado del rodete …… 16
Figura 2.10. Evolución de bloques y pre-mallado del tubo de descarga……..... 17
Figura 2.11. Condiciones de borde de cada dominio de la turbina tipo Francis…… 17
Figura 2.12. Interfaces entre dominios de la turbina tipo Francis……..... 18
Figura 2.13. Interacción Rotor – Estator…….. 20
Figura 3.1. Resultado de la simulación en CFX del perfil de velocidad…….. 23
Figura 3.2. Vista de detalle del perfil de velocidad desde la entrada de los álabes directrices hasta la salida del rodete…… 24
Figura 3.3. Resultado de la simulación en CFX del perfil de presión…….. 25
Figura 3.4. Vista de detalle del perfil de presión desde la entrada de los álabes directrices hasta la salida del rodete……..... 25
Figura 3.5. Perfil de la presión del fluido en una vista superior…… 26
Figura 3.6. Perfil de la presión del fluido en las superficies de las paletas del Rodete…… 27
Figura 3.7. Coeficiente de presión en una línea de corriente…… 28
Figura 3.8. Velocidad adimensional en una línea de corriente…….. 29
Figura 3.9. Resultado de la simulación en CFX del perfil de velocidad para un t=0.061 s y t=0.182 s…… 29
Figura 3.10. Resultado de la simulación en CFX del perfil de presión para un

T=0.014 s y t=0.182 s…… 30
Figura 3.11. Perfil de la presión del fluido en una vista superior para un t=0.182…..... 30
Figura 3.12. Puntos de coeficientes en los dominios de la turbina tipo Francis…… 31
Figura 3.13. Coeficiente de presión en el punto 1 …… 32
Figura 3.14. Coeficiente de presión en el punto 2 …… 32
Figura 3.15. Coeficiente de presión en el punto 3 …… 33
Figura 3.16. Coeficiente de presión en el punto 4 …… 33
Figura 3.17. Vorticidad bajo Q-criterion a un valor de Q=815 …….. 34
Figura AI.4.1. Zonas de la caja espiral…….. 44
Figura AI.4.2. Topología de bloques de la caja espiral: (a) Zona 1 (b) Zona 2 (c) Zona 3……..... 45
Figura AI.4.3. Evolución de bloques de la caja espiral…… 46
Figura AI.4.4. Pre-mallado de la caja espiral…… 46
Figura AII.4.1. Simplificación de los álabes directrices…… 48
Figura AII.4.2. Evolución de bloques y Pre-mallado de un álabe directriz …… 48
Figura AII.4.3. Pre-mallado de los álabes directrices…….. 49
Figura AIII.4.1. Simplificación de la geometría del rodete…….. 50
Figura AIII.4.2. Evolución de las topologías de bloques en el rodete…… 52
Figura AIII.4.3. Visualización del pre-mallado del rodete…… 53
Figura AIV.4.1. Evolución de bloques del tubo de descarga……..... 54
Figura AIV.4.2. Visualización del pre-mallado del tubo descarga…… 55
Figura X.4.1. Esquema del flujo de expresiones para obtener el coeficiente de presión de cuatro puntos en estado inestable……..... 62
Figura X.4.2. Expresiones para la obtención de la eficiencia de la turbina …… 62

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Condiciones de fluido para la simulación…… 19
Tabla 2.2. Condiciones físicas de fluido…….. 19
Tabla 2.3. Configuración para simulación en CFX …….. 20
Tabla 3.1. Relación entre los números de elementos con los números de nodos de cada subdominio…… 21
Tabla 3.2. Porcentaje de reducción de elementos…… 22
Tabla 3.3. Comparación del valor omega entre dos tipos de mallado…….. 22
Tabla 3.4. Valores constantes de la turbina ……..... 35
Tabla 3.5. Número de iteraciones para la convergencia de la eficiencia…….. 36
Tabla 3.6. Porcentaje de error en una malla estructurada …….. 37
Tabla AI.4.1. Criterios de calidad del dominio de la caja espiral…… 47
Tabla AII.4.1. Criterios de calidad del dominio de los álabes directrices…….. 49
Tabla AIII.4.1. Criterios de calidad del dominio del rodete…….. 53
Tabla AIV.4.1. Criterios de calidad del dominio del tubo de descarga…….. 55

# ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1 ..... 21
Ecuación 3.2. ..... 21
Ecuación 3.3. ..... 27
Ecuación 3.4. ..... 28
Ecuación 3.5. ..... 35
Ecuación 3.6. ..... 35
Ecuación 3.7. ..... 36
Ecuación 3.8. ..... 36
Ecuación 3.9. ..... 37

# RESUMEN

Este documento contextualiza la metodología para desarrollar un tipo de malla estructurada como una herramienta de apoyo fundamental en el proceso de optimización y análisis de las turbinas tipo Francis. Esta estrategia ofrece una clara ventaja en los siguientes aspectos: alta calidad y grado de control, mejor alineación y convergencia, usa menos memoria de almacenamiento y computacionalmente más rápida. La generación de mallas estructuradas se desarrolla en el software ICEM CFD a partir de una optimización del modelo para posteriormente a través de una estrategia de multibloques, incluidas las geometrías y cuerpos sólidos presentes en el campo de flujo o que encierren el dominio del flujo puedan alcanzar una calidad de malla aceptable evitando volúmenes negativos. Las condiciones estables e inestables en ANSYS CFX simulan los efectos del flujo, obteniendo resultados de velocidad, presión y eficiencia de la turbina muy cerca de los datos experimentales para validar el tipo de malla estructurada.

**Palabras clave:** Malla estructurada, rodete, simulación estable e inestable, Turbina Francis.

# ABSTRACT

This paper contextualizes the role of the methodology to develop a type of structured mesh as a fundamental support tool in the process of optimization and analysis of Francis turbines, this strategy offers a clear advantage in the following aspects: high quality and control degree, better alignment and convergence, uses less storage memory and computationally faster. The generation of structured meshes is developed in the ICEM CFD starting with optimization of the model and subsequently through a multi-block strategy, including the geometries and solid bodies present in the flow field or that enclose the flow domain can reach an acceptable mesh quality avoiding negative volumes. Stable and unstable conditions in ANSYS CFX simulate the effects of flow obtaining results of speed, pressure and efficiency of the turbine very close to experimental data to validate the type of structured mesh.

**Keywords:** Structure mesh, runner, steady and unsteady simulations, Francis Turbine

# DESARROLLO Y ESTUDIO DE UN MALLADO ESTRUCTURADO OPTIMIZADO PARA UNA TURBINA TIPO FRANCIS CON VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

## INTRODUCCIÓN

Actualmente en el Ecuador de acuerdo al Balance Nacional de Energía Eléctrica a mayo 2019, la generación de energía eléctrica en base a hidroeléctricas representa el 62,59 % de capacidad efectiva [1], por lo cual es importante optimizar los estudios en turbomáquinas mediante un mallado estructurado que representa el 70% de los resultados [2], mientras que en una malla no estructurada induce resultados como el trabajo previo realizado por Mora [3].

Dentro del proyecto de investigación PIJ 17-13 sobre la Investigación y evaluación de modelos de cavitación-erosión aplicados a prevención de daños en turbinas hidráulicas de las centrales hidroeléctricas del Ecuador. Uno de los objetivos es optimizar la simulación numérica en turbinas mediante una malla estructurada y capturar el desarrollo del flujo en simulaciones inestables que en el trabajo previo por Mora no realizo por la complejidad de las interfaces generadas en un mallado no estructurado.

A partir de la descomposición del dominio de la turbina tipo Francis con características similares a la hidroeléctrica de San Francisco – Ecuador, la geometría presenta ausencia de curvas, curvas excedentes y superficies superpuestas que inducen a la creación de volúmenes negativos, restringiendo el desarrollo del mallado por lo cual se realiza una simplificación del modelo para desarrollar un mallado estructurado a través de ANSYS ICEM CFD [4].

La dinámica del fluido se realiza con un enfoque basado en el tensor del gradiente de velocidad, donde Q-criterion representa la magnitud de vorticidad en el espacio tridimensional. [5]

## Pregunta de Investigación

¿El mallado estructurado permite la optimización de la simulación del fluido en turbinas tipo Francis con características similares a la Hidroeléctrica de San Francisco - Ecuador?

## Objetivo general

Desarrollar y estudiar un mallado estructurado optimizado para una turbina tipo Francis con validación experimental.

## Objetivos específicos

- Realizar una síntesis del estado del arte.
- Desarrollar una metodología para el mallado estructurado de la turbina tipo Francis.
- Simular los efectos de flujo de la turbina en condiciones estables e inestables.
- Validar el estudio realizado con la simulación con estudios experimentales de las centrales hidroeléctricas.
- Optimizar el mallado considerando los efectos de reproducción de alta vorticidad y Q-criterion

# 1. MARCO TEÓRICO

El presente trabajo se encuentra dentro del proyecto PIJ 17-13 y es parte de un estudio previo realizado por Mora [3], el cual obtiene los dominios computacionales que conforman la turbina Francis de la Central Hidroeléctrica San Francisco mediante ingeniería inversa. Por lo que, en esta sección se presenta una revisión bibliográfica para la generación de un mallado estructurado en cada dominio de la turbina.

## 1.1. Mallado estructurado

Una malla es la descomposición o discretización de un dominio geométrico en pequeñas formas simples, como triángulos o cuadriláteros en dos dimensiones y tetraedros o hexaedros en tres dimensiones para su cálculo consecutivo. Las mallas son utilizadas como algoritmos para la solución numérica de las ecuaciones diferenciales que surgen en la simulación física [4]

Para la generación de una malla estructurada se define bloques grandes y posteriormente se divide en elementos hexaédricos pequeños, que permiten localmente refinar regiones de flujo complejo, el principal inconveniente es el tiempo requerido para el desarrollo en geometrías complejas [5], una buena malla es esencial para el análisis de CFD porque reduce la difusión numérica, evita el error de discretización, converge la solución más rápida y evita las correcciones del solucionador para la no ortogonalidad que crea soluciones no físicas [6]

Para fines de ilustración se considera un flujo dentro de un conducto rectangular, el mismo es representado por una malla cartesiana distribuida uniformemente a lo largo de la dirección *x* y *y,* como se ilustra en la Figura 1.1 [7].

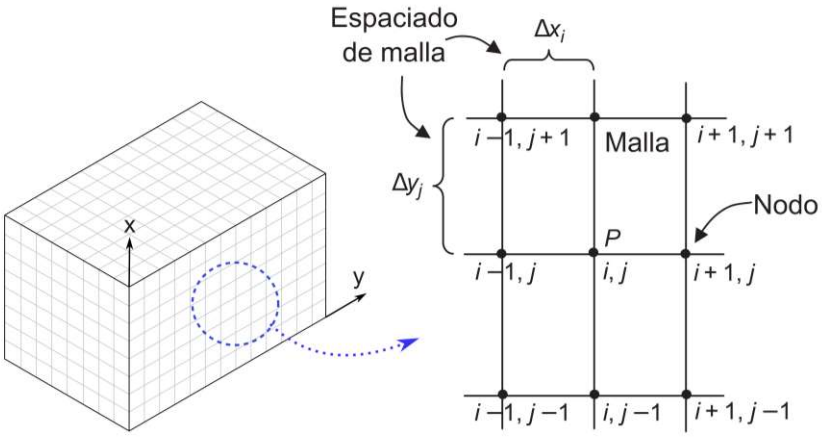
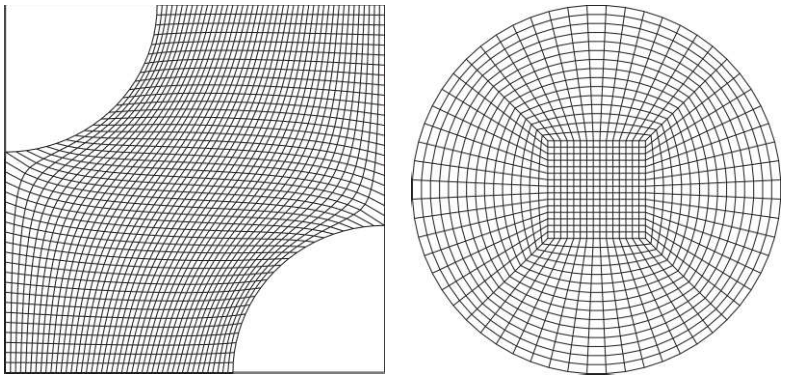



Figura 1.1. Una malla rectangular uniforme
(Fuente: Propia)

## 1.2. Topología de mallado

Mediante un enfoque de multibloques se determina una topología aceptable, porque el dominio se ensambla a partir de una serie de bloques estructurados que se unen entre sí, permitiendo a cada bloque determinar la mejor topología de malla para evitar el aumento de la no ortogonalidad o la asimetría de la malla [7].

La Figura 1.2 presenta un ejemplo de una malla de tipo H grid diseñada para el cálculo del flujo en un segmento de simetría y una malla tipo O grid con un ángulo muy agudo para un cilindro circular [7].



(a) (b)

Figura 1.2. (a) Generación de una malla tipo H grid para el cálculo de flujo en un segmento de simetría. (b) Generación de una malla tipo O grid para un cilindro circular
(Fuente: [7])

Por otro lado, la utilización de una malla no estructurada se ha vuelto más frecuente y generalizado en muchas aplicaciones de CFD. La mayoría de los códigos comerciales de hoy en día se basan en el uso de mallas no estructuradas por lo cual las celdas se ensamblan libremente dentro del dominio computacional, generando inestabilidades numéricas y deterioro de los resultados computacionales. [8]

## 1.3. Capa límite

Para resolver la capa límite en un mallado estructurado, se requiere agrupar la cuadrícula en la dirección normal a la superficie con el espaciado del primer punto de la cuadrícula fuera de la pared para que esté dentro de la subcapa laminar de la capa límite.

Existen 2 tipos generales de capas limites como se muestra en la Figura 1.3; En una capa límite laminar, el flujo muestra un comportamiento en capas, mientras que en una capa límite turbulenta el flujo es caótico y puede tener componentes de accionamiento en una dirección perpendicular a la superficie. Esto causa vórtices de pequeña escala y conduce

a un aumento en la fricción. Debido a las inestabilidades, el flujo puede ir desde un estado laminar a un estado turbulento en un punto de transición.

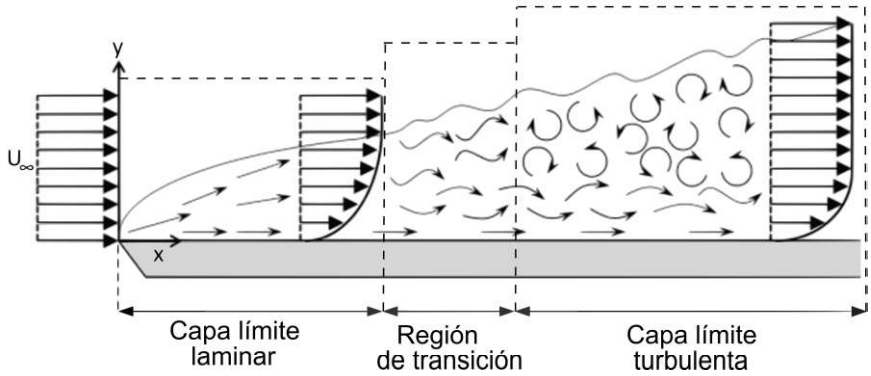



Figura 1.3. Tipos generales de capas límites
(Fuente: [10])

Para flujos turbulentos es recomendable resolver la capa límite hasta la pared con una malla más fina, caso contrario el modelo de turbulencia pueden calcular incorrectamente las propiedades de flujo, lo que podría introducir errores en los resultados de presión y velocidad.

## 1.4. Estrategia bloques múltiples

La estrategia de bloques múltiples o la descomposición del modelo dividen en bloques más pequeños y luego generan mallas separadas en cada bloque individual. La Figura 1.4 muestra un esquema de una descomposición de los bloques B1, B2 y B3.
Un bloque corresponde a un subdominio que es geométricamente mucho más simple que la configuración completa.

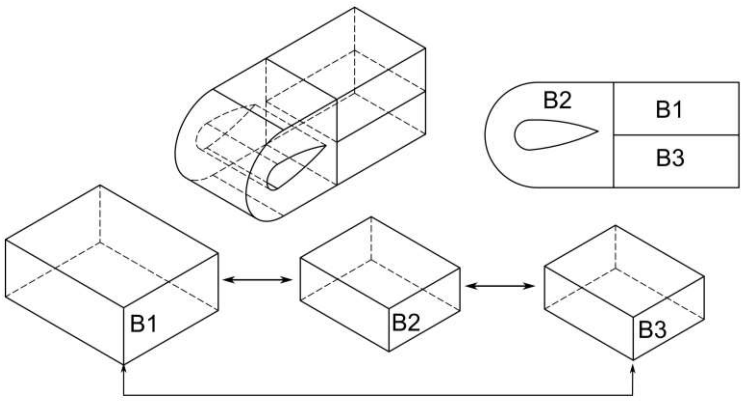



Figura 1.4. Representación multibloque para malla C-H alrededor de un perfil del ala de un avión
(Fuente: [9])

En ANSYS ICEM CFD el enfoque convencional para el mallado estructurado de bloques múltiples define manualmente una topología de bloque, los vértices, los bordes y las caras

de la topología de bloques se asocian con la geometría importada o creada, un elemento dado de la topología de bloque puede asociarse con varias caras o aristas geométricas, logrando efectivamente una topología virtual que combina estas caras o aristas. Las configuraciones de mallas de tipo C u O grid alrededor de un orificio interior se pueden usar como elementos macro en la definición de bloque.

Alakashi & Basuno realizan un análisis comparativo entre el tipo de malla estructurada y no estructurada para resolver dos problemas de flujo interno y un problema de flujo externo a través del elemento NACA0012, la implementación del volumen finito requiere una discretización del dominio, en este aspecto puede adoptarse una generación de mallado estructurado y no estructurado, en base a los resultados se concluye que los dos tipos de mallado pueden producir cercanamente el mismo resultado.

El mallado estructurado podría ser difícil implementarlo en el caso de un dominio complejo a diferencia del mallado no estructurado [8]. La precisión de la simulación depende de gran medida de la calidad de la malla, un mallado de buena calidad que considere la física del flujo lleva a una convergencia más rápida y una mejor solución, este estudio lo realiza Khare et al, con las siguientes directrices donde un mallado no estructurado se genera más rápido que un estructurado para un problema en particular, este tipo de malla hexaédrica puede tomar un gran tiempo para ejecutarla, los cálculos en mallado estructurado toman menos tiempo que un no estructurado porque los datos y algoritmos existentes son más eficientes [10].
Los efectos del tipo de mallado y la convergencia en simulaciones numéricas realizadas por Lin et al buscan resultados aceptables a los experimentales en un tipo de bomba centrifuga, se evalúan los efectos de generación de malla incluyendo el tipo hexaédrico, no estructurado e híbrido, se encuentra que lo tres tipos de mallas tienen ciertas diferencias para las distribuciones de velocidades en el impulsor y los resultados de la simulación tienen errores en diferentes grados en comparación con los datos experimentales, concluyendo que el mallado estructurado presenta mejores condiciones de aceptación , el valor de convergencia GCI para la malla estructurada calculada es la más baja que las demás, además se observa que una malla estructurada obtiene más vórtices en el paso del impulsor, pero los campos de flujo en la mayoría de las bombas para los tres tipos de malla son cualitativamente similares [11].

En el trabajo realizado por Morgut & Nobile presenta una comparación entre los enfoques de mallado estructurado e híbridos no estructurados para la predicción numérica del flujo

alrededor de las hélices marinas en un flujo homogéneo, el objetivo es verificar si la precisión basada en mallados estructurados es significativamente mejor en las predicciones de un mallado híbrido para justificar el tiempo de mallado a través de esta estrategia, en conclusión los valores numéricos de coeficiente de empuje y torsión calculados utilizando los dos tipos de mallas están en línea con los datos experimentales para condiciones operativas y se encuentran en el rango del 3% - 4% además los perfiles de velocidad calculados presentan características similares, las curvas de rendimiento calculadas con mallas estructuradas son ligeramente mejores que las descritas con mallas híbridas [12].

La utilización de mallas estructuradas en los trabajos mencionados han requerido un tiempo extra de generación en comparación con los obtenidos de forma automática, pero las ventajas de los resultados compensa el tiempo empleado, permitiendo una convergencia más rápida y con resultados numéricos cercanos a los experimentales, lo que se trata de desarrollar en este trabajo aplicando una metodología para la generación de un mallado estructurado en una turbina Tipo Francis que por su geometría requiere un análisis de discretización del dominio para obtener un mallado aceptable.

El desarrollo de las simulaciones numéricas representa una mejora a diseños conceptuales y a una solución rápida mediante los resultados extraídos de CFD. Las principales ventajas del CFD con respecto a los estudios experimentales son [13]:

- Reducción de plazos y nuevos costes de diseño.
- Posibilidad de estudiar sistemas en condiciones peligrosas o fuera de las condiciones de trabajo.
- Posibilidad de estudiar sistemas en los que un experimento sea difícil de controlar.
- Resultados con gran cantidad de datos

Las metodología utilizada para la discretización en turbinas tipo Francis se presenta en el trabajo realizado por Trivedi et al, que en condiciones de operación utiliza un mallado estructurado para todo el dominio formado por bloques continuos de malla hexaédricas que fueron elaboradas en cada subdominio, un total de 12.8 millones de elementos hexaédricos fueron creados en la turbina desde el ingreso de la caja espiral hasta la salida del tubo de descarga, en conclusión se obtienen coeficientes de presión similares a la parte experimental con una diferencia máxima del 12% observados en el rodete y una diferencia del 2% en el tubo de descarga [14].

La simulación numérica de turbina tipo Francis realizada por Lain et al muestra una metodología para simulaciones estables e inestables, estas proporcionan la pendiente de la turbina y la dinámica de la presión fluctuante respectivamente, la estrategia consiste en realizar una cuadricula para cada dominio y contralor su número de celdas, permitiendo manualmente refinar la cuadricula en zonas más sensibles para obtener una calidad de malla aceptable de cada dominio, los resultados obtenidos concuerdan con los datos experimentales [15].

# 2. METODOLOGÍA

Esta sección se describe la metodología para la generación de mallado estructurado utilizando ANSYS ICEM CFD, en la Figura 2.1 se especifica el proceso para la generación de malla utilizando una estrategia de multibloques para cada dominio de la turbina tipo Francis.

## 2.1. Procedimiento

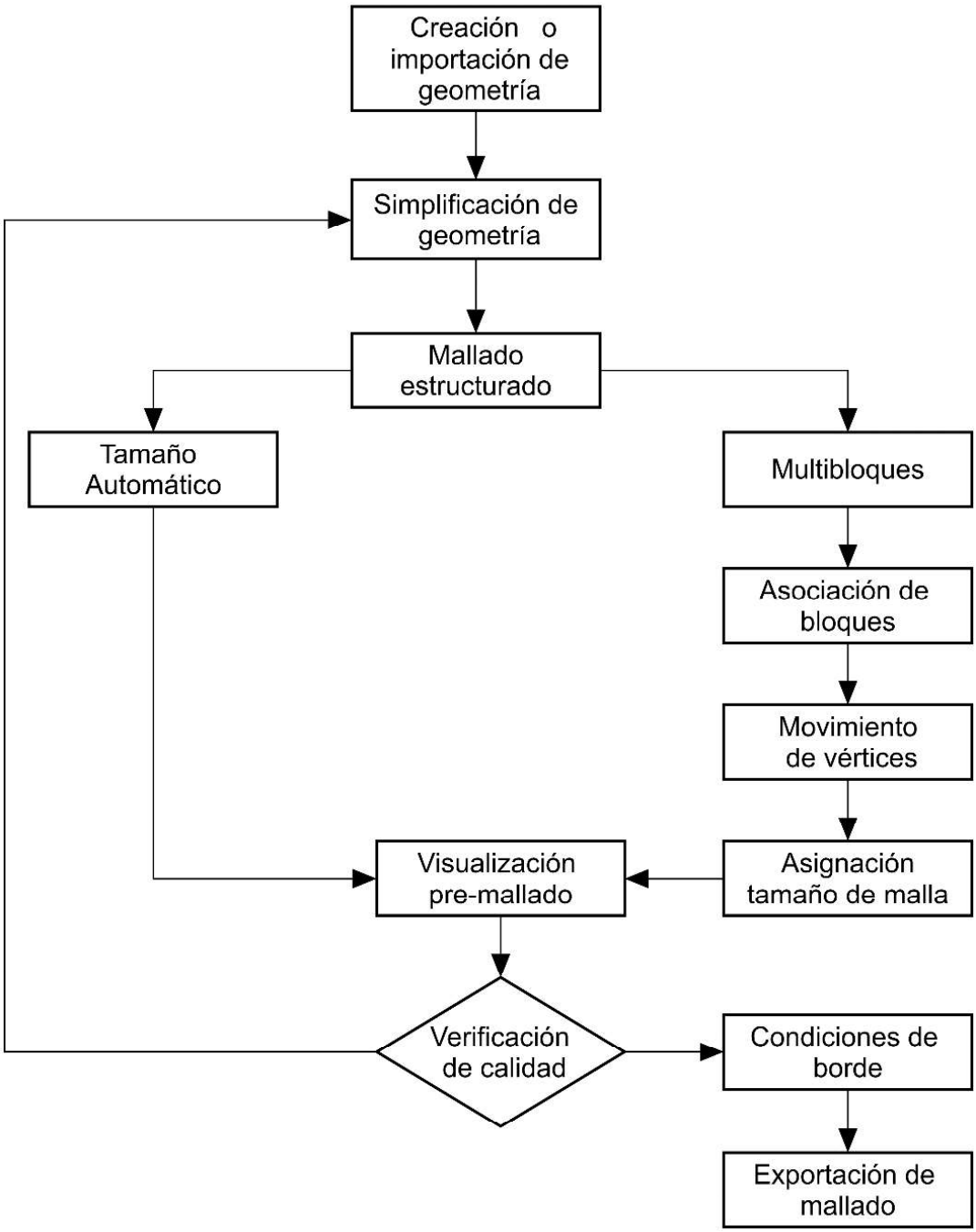



Figura 2.1. Metodología utilizada para la generación de mallado estructurado
(Fuente: Propia)

El proceso inicia con la creación de la geometría o para un caso de mayor complejidad requiere la importación de la geometría realizada en un programa CAD, para la turbina los dominios en estudio fueron obtenidos en un trabajo previo realizado por Mora a través de escáner 3D [3].

A continuación, la simplificación de geometría es necesaria porque en una importación existen puntos, líneas y superficies adicionales al requerido por el dominio, se realiza una estrategia de multibloques para dividir un bloque principal en otros de menor tamaño que a través de un proceso de fácil adaptación a la geometría se relacionen los vértices, líneas y superficies con el dominio.

La asignación de bloques está relacionada con la adaptación de los vértices, el tamaño de malla es controlable y se asigna con el número de divisiones para cada vértice del bloque y en cada borde se puede realizar un refinamiento a las paredes, a través de una visualización de pre-mallado se observa la generación progresiva de la malla en estudio y se evalúa la calidad de mallado para definir condiciones de borde como ingreso, salidas o paredes. Finalmente se realiza la exportación de mallado a los múltiples tipos de solucionadores disponibles, para este estudio se utiliza ANSYS CFX.

## 2.2. Simplificación de geometría

La práctica habitual es conservar los detalles que son importantes para la simulación y garantizar una geometría que limite el fluido de la turbina en cada componente. Un ejemplo general de una optimización del modelo se define:

- Eliminación de componentes no expuestos al flujo.
- Eliminación de entradas duplicadas
- Eliminación de pequeños detalles
- Unión o adición de superficies
- Reconstrucción de la conectividad geométrica entre las partes

Si la geometría presenta ausencia de curvas o superficies superpuestas entonces la malla resultante puede presentar varios errores y también induce a la creación de volúmenes negativos que para un mallado es lo que se busca evitar.

La simplificación en la caja espiral requiere la eliminación de curvas y superficies excedentes en las paredes externas, en los álabes directrices se adicionan curvas de referencia en la

vista superior e inferior para cada canal hidráulico formado entre dos álabes directrices como se muestra en el Anexo II. La Figura 2.2 muestra en el rodete una reducción significativa de múltiples líneas y superficies abiertas que son innecesarias durante la estrategia de multibloques y se simplifica hasta obtener las curvas que limitan las paredes y las paletas del rodete.

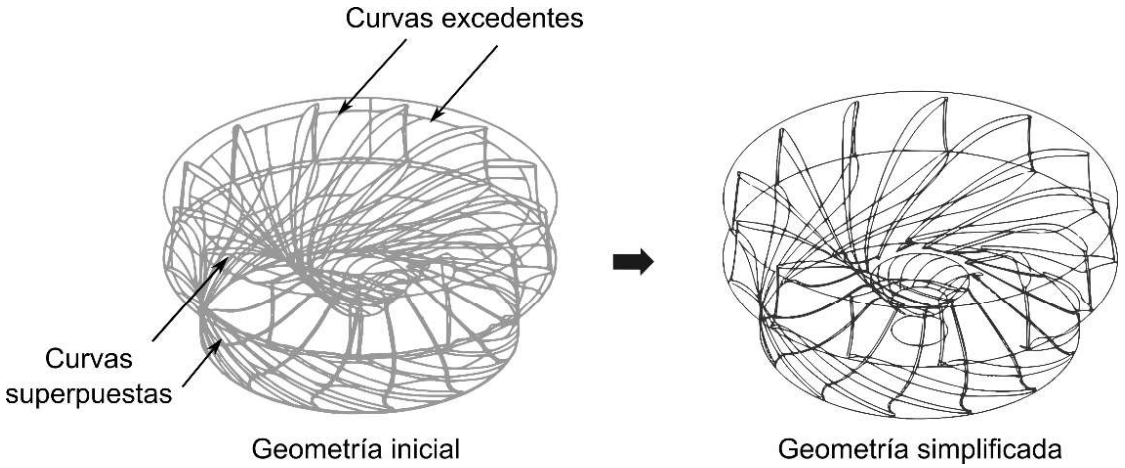



Figura 2.2. Simplificación geométrica del rodete
(Fuente: Propia)

En el tubo de descarga se eliminan curvas excedentes en las superficies externas y se completan curvas que no son reconocidas para formar anillos circulares y rectangulares en su geometría.

## 2.3. Dominio Computacional

La geometría del conjunto de la turbina tipo Francis es obtenida en un trabajo previo por Mora [3], mediante planos dimensionales y proceso de ingeniería inversa se obtienen los volúmenes que se utilizara para realizar el mallado estructurado. La turbina Francis está dividida en sus componentes: caja espiral, álabes directrices, rodete y tubo de descarga, estas partes se presentan en la Figura 2.3.

El primer dominio computacional para realizar el mallado es la caja espiral en conjunto con el pre distribuidor que forman un solo cuerpo, a continuación el dominio de los álabes directrices se considera en su apertura máxima para condiciones de operación a un valor de 24° desde la posición cuando están totalmente cerrado, después el dominio del rodete presenta cierta complejidad, debido a que su geometría requiere ser analizada en la etapa de simplificación y por último el dominio del tubo de descarga. Con el sistema computacional CFX se realizará la unión de todas las mallas y se realiza el post procesamiento.

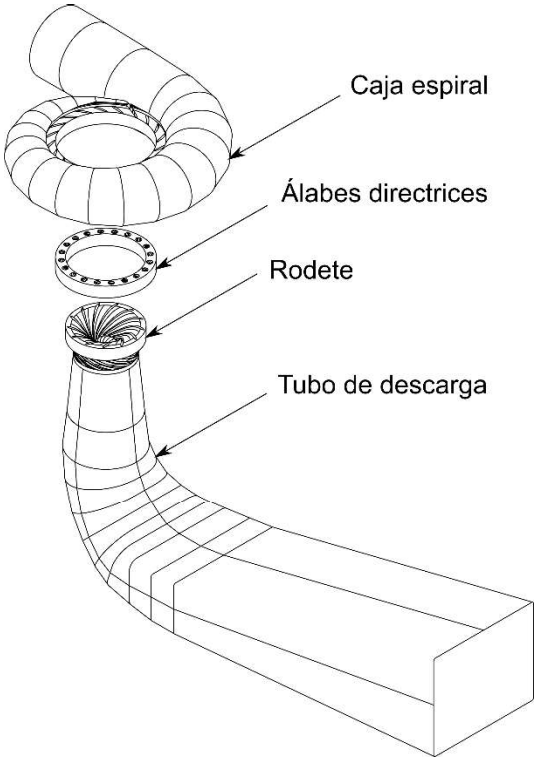



Figura 2.3. Dominios de la turbina Francis
(Fuente: Propia)

### 2.3.1. Archivo de importación

Si el software de modelado tiene una extensión del programa de ANSYS ICEM, se recomienda usar el mismo para transportar la geometría del modelo sólido al espacio de trabajo de malla [16], caso contrario se puede utilizar archivos con las extensiones *.step, *. Igs,*. iegs,*. srt, etc. En la selección de detalles de estos archivos se consideran los siguientes puntos:

- Estructura alámbrica: proporciona solo bordes como salida.
- Superficies: proporciona todas las partes de las superficies y los límites de la superficie.
- Sólidos: proporciona superficies con información de unión como salida.
- Carcasas: esto incluye información de topología de superficie que permite la exportación de capas de superficie e información sólida.
- Curvas de referencia y puntos de referencia: esto incluye solo curvas de referencia y puntos de referencia.

En este tipo de modelos la mayoría de los problemas ocurren con superficies pequeñas y curvas que al importarlos en ICEM CFD no aparecen todos los detalles necesarios para obtener una geometría aceptable. Estos problemas se pueden resolver exportando archivos CAD moderadamente limpios como archivos CAD nativos, archivos parasolid,

archivos ASCII, etc. La extensión que presenta una importación aceptable es del tipo parasolid y se aplica a todos los dominios de la turbina tipo Francis.

## 2.4. Estrategia de multibloques

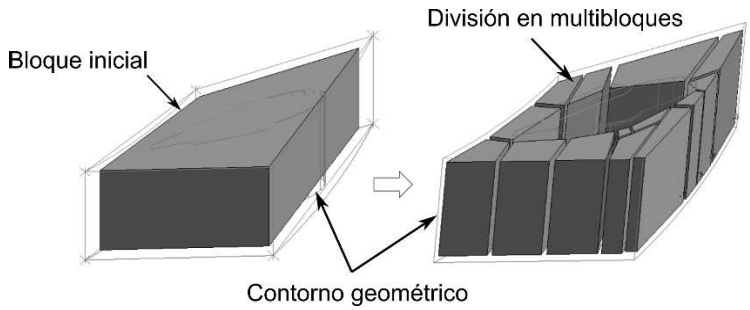



Figura 2.4. División en multibloques
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.4 un bloque 3D unitario se crea en la geometría donde se realiza un adecuado bloque que permite abarcar la geometría en cada dominio de la turbina, los multibloques dividen una geometría en grandes formas cuadriculares y estructura la dirección de las líneas de la cuadrícula según la disposición de los bloques. Existen dos topologías de inicio: de arriba hacia abajo donde se inicia con un bloque que rodea toda la geometría del dominio y a través de herramientas se eliminan bloques pequeños o se aplica técnicas de O-grid, Y-grid o T-grid. La segunda topología de abajo hacia arriba consiste en formar bloques de menor tamaño en una zona específica de la geometría y a partir de esta crear bloques adyacentes.

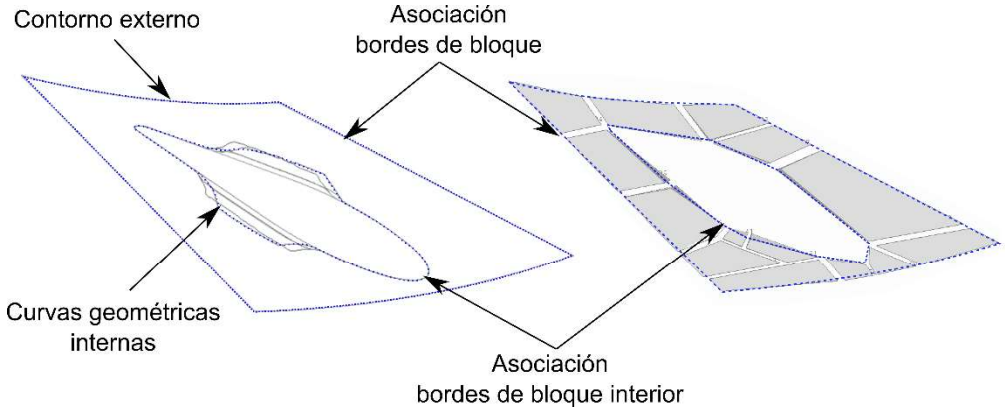



Figura 2.5. Asociación entre bordes y curvas
(Fuente: Propia)

La Figura 2.5 representa el siguiente paso que consiste en asociar los bordes y vértices de bloques con puntos y curvas de la geometría, y las caras de los bloques con superficies, la aplicación de los parámetros de borde y los parámetros de malla previa se realizan para definir el número de nodos y la calidad de la malla a través del histograma mostrada en la

Figura 2.6 como: el determinante que define una medición de la deformación del elemento, la mayoría de los solucionadores aceptan valores > 0.1, el ángulo representa los valores internos aceptables a un valor > 10°. Los dominios de la turbina son evaluados a través del determinante, ángulo y calidad.

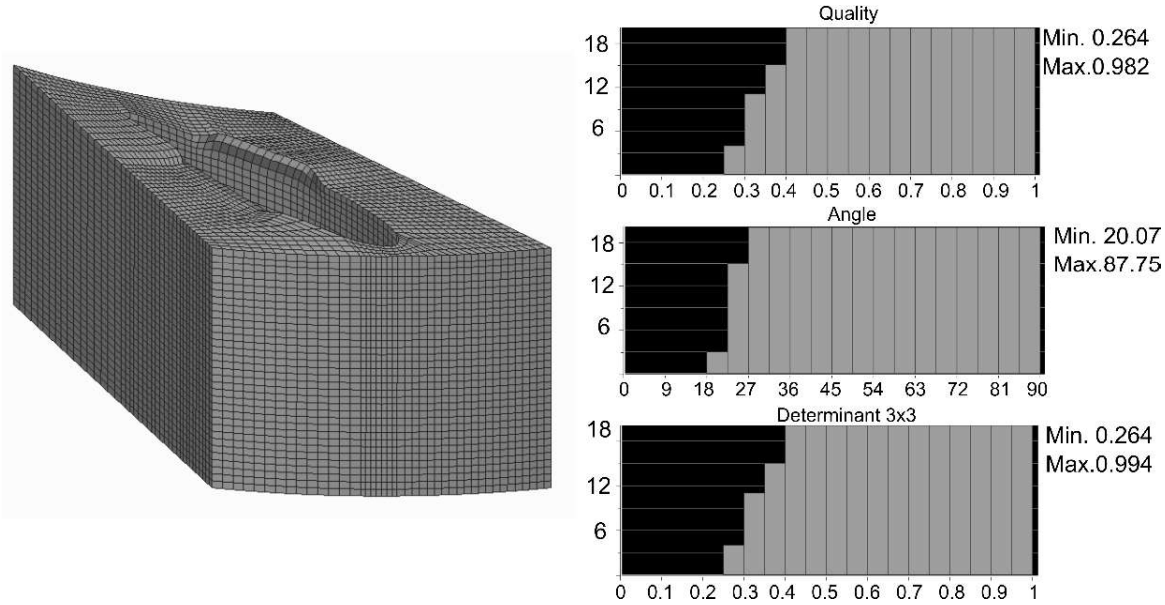



Figura 2.6. Visualización de histogramas de calidad de mallado
(Fuente: Propia)

En el determinante, los valores máximos y mínimos están entre 0.4 y 1, y en los ángulos entre 30 y 90°. Sin embargo, en algunas situaciones donde las ligaduras geométricas sean muy exigentes, se pueden tolerar valores por fuera de este rango, ya que es preferible tener unos pocos elementos de baja calidad, con una buena calidad global de la malla, antes que sacrificar la calidad de toda la malla por eliminar unos pocos elementos muy distorsionados [17].

Para la etapa final se especifica las condiciones de contorno en las superficies geométricas como: entrada, salida, paredes, periodicidad, simetría, etc. La pre-malla de calidad anhelada se convierte en malla y se somete a una verificación de malla mediante los histogramas de calidad, posteriormente se exporta al formato del solucionador, para este estudio se realiza en ANSYS CFX.

En la caja espiral se definen tres zonas y la metodología se explica en el Anexo I, se inicia en la zona 1 con una topología de abajo hacia arriba y se aplica una técnica O-grid en todos los bloques, posteriormente se colapsan los vértices de la arista externa al inicio de la zona 2. Para los álabes fijos se realiza una extrusión de las caras de la zona 2 y 3 hacia el interior de la caja espiral, el conjunto de bloques y visualización de pre-mallado se muestra en la Figura 2.7. En base a los criterios de calidad se obtiene un porcentaje mayoritario de

elementos para un ángulo mayor a 15° y un valor mayor a 0.3 bajo el criterio Quality como se indica en la Tabla AI.4.1 del Anexo I

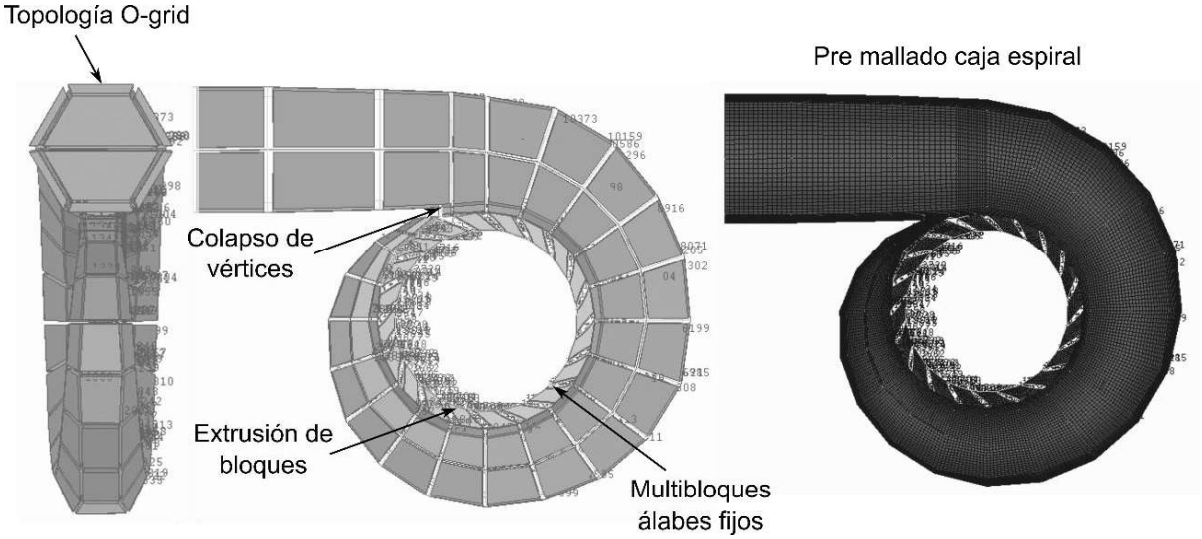



Figura 2.7. Evolución de bloques y pre-mallado de la caja espiral
(Fuente: Propia)

La metodología de los álabes directrices se describe en el Anexo II, se utiliza una topología de arriba hacia abajo, un bloque inicial para cada álabe y en cada uno se dividen en multibloques hasta completar el dominio total de los álabes directrices como se muestra en la Figura 2.8, la malla del domino tiene una calidad mínima de 0.3 bajo el criterio de Quality representados en la Tabla AII.4.1 del Anexo II.

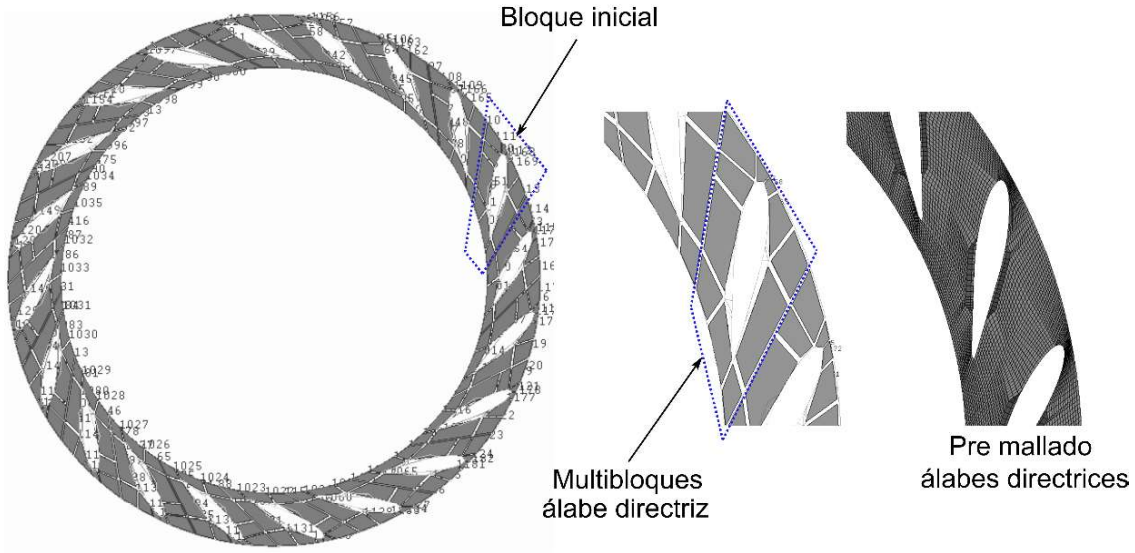



Figura 2.8. Evolución de bloques y pre-mallado de los álabes directrices.
(Fuente: Propia)

Para el dominio del rodete se aplica una topología de abajo hacia arriba y su metodología se describe en el Anexo III, el punto de inicio es la base, con una extrusión de bloques se forma un anillo y se colapsan entre ellos para formar un punto común de intersección con

una topología Y-block y la creación de ¼ de O-grid. Los siguientes multibloques son la extrusión de las caras externas hasta el inicio de las paletas del rodete, el canal hidráulico entre las paletas se forma con la extrusión de cada cara para cada bloque hasta una altura media de la paleta y se completa hasta formar el canal hidráulico, para el cierre de los bloques superiores se utiliza la operación de crear bloques entre las caras de los bloques adyacentes para cerrar el contorno del volumen de control como se muestra en la Figura 2.9.

Se asocian los bloques a las zonas geométricas del rodete y una asociación entre las superficies de las paletas con las caras de cada bloque adyacente para evitar la generación de volúmenes negativos. Bajo el criterio de Quality se obtiene valores mayores a 0.1 con un ángulo mayor a 10° en el resto de elementos, la visualización de pre mallado se muestra en la Figura 2.9 y en la Tabla AIII.4.1 del Anexo III donde se describe los valores de calidad para los elementos desarrollados.

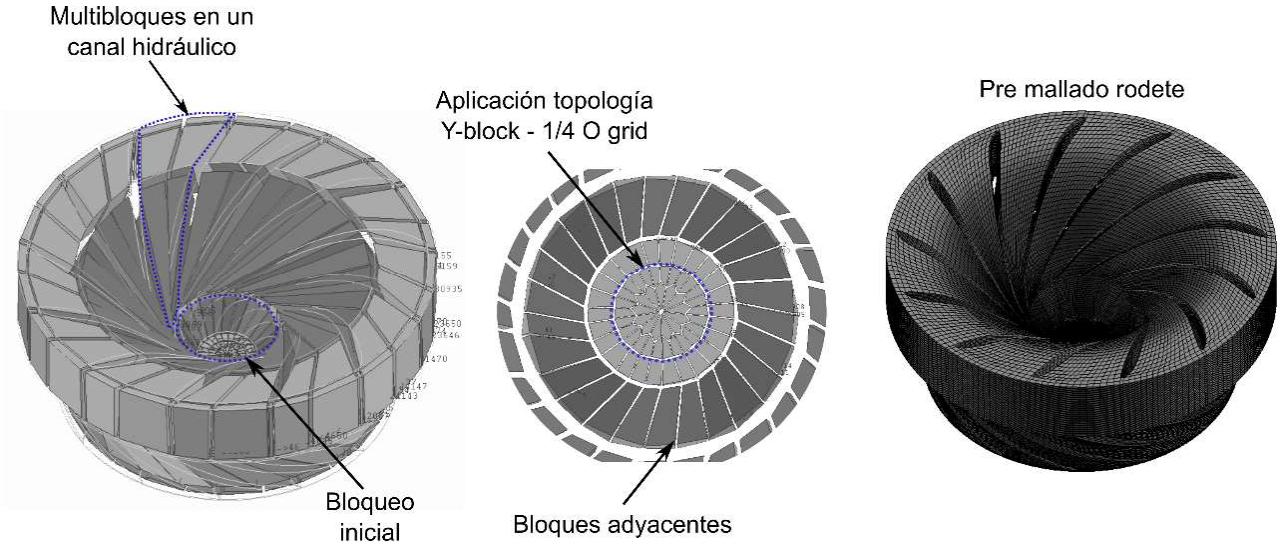



Figura 2.9. Evolución de bloques y pre-mallado del rodete
(Fuente: Propia)

La metodología del tubo de descarga se describe en el Anexo IV, se inicia con la estrategia de abajo hacia arriba con una operación de extrusión de caras en cada bloque hasta formar un conjunto de bloques continuos a lo largo del tubo de descarga como se muestra en la Figura 2.10. Cada borde es asociado a la geometría, se aplica un O-grid para todos los bloques.

La calidad de malla tiene valores mínimos de 0.5 bajo el criterio de Quality y un ángulo mínimo de 36°, la Tabla AIV.4.1 del Anexo IV describe la calidad para todos los elementos.

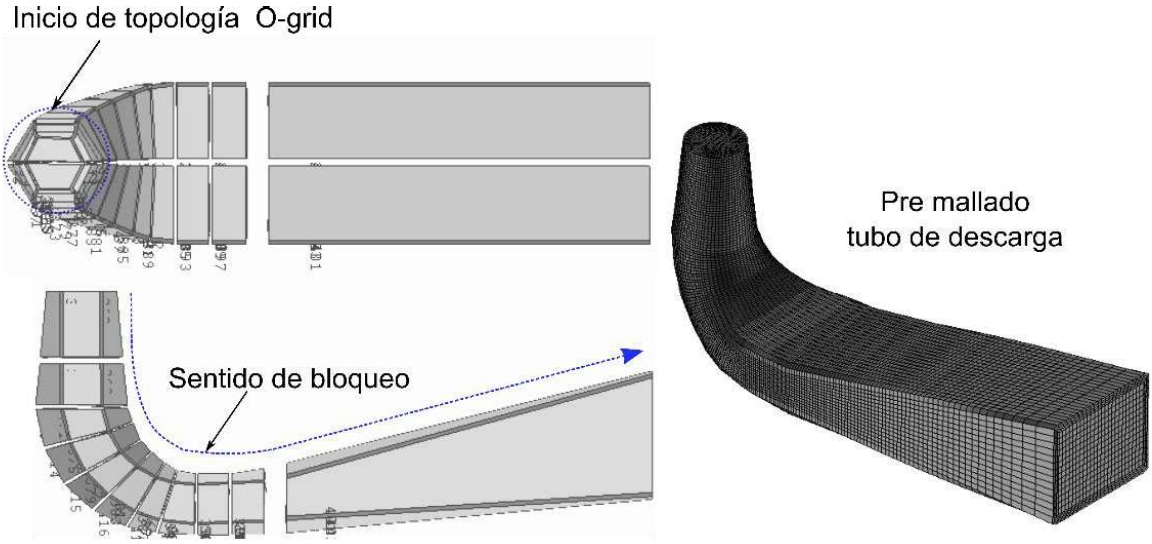



Figura 2.10. Evolución de bloques y pre-mallado del tubo de descarga
(Fuente: Propia)

## 2.5. Condiciones de borde y frontera

Las condiciones de borde definidas en cada sub dominio de la turbina son generadas en ICEM CFD a través de zonas o partes de ingreso, salidas y paredes. Las partes pueden ser: curvas, superficies, cuerpos, puntos e incluso una mezcla de todos ellos que definen las condiciones de contorno para las curvas (en 2D) y para las superficies (en 3D). En la Figura 2.11 se representa los dominios de la turbina con su respectivo ingreso, salida y paredes, para un caso en particular el rodete requiere definir sus paletas como una parte adicional para el análisis de la eficiencia. El resultado de un pre mallado se convierte a una malla permanente dependiendo del formato del solucionador en este caso en ANSYS CFX se exporta cada dominio con su malla.

Figura 2.11. Condiciones de borde de cada dominio de la turbina tipo Francis
(Fuente: Propia)

## 2.6. Condiciones de simulación en estado estable

Los métodos de conexión entre mallas pueden conllevar a una mejora en la proximidad de resultados y en el costo computacional, los acoplamientos se definen como interfaces que conectan diferentes dominios para la formación de la geometría general como se muestra en la Figura 2.12. Para soluciones de conexión de malla se utilizó el método de interfaz

ideal de mallado que ha demostrado una interesante interfaz acorde al marco de referencia giratorio el cual es uno de los principales métodos con los cuales se tratan a turbo-maquinarias, es decir que un marco de referencia se adjunta a un dominio en movimiento y presenta que el campo de flujo en estado inestable en un marco estacionario puede volverse estable cuando se ve en un marco giratorio [18].

La Interfaz I conecta la caja espiral con los álabes directrices; la Interfaz II conecta los álabes directrices con el rodete y la Interfaz III conecta el rodete con el tubo de descarga, cada interfaz está ubicada en la entrada y salida de cada subdominio, el rodete de la turbina gira sobre el eje z, mientras que la caja espiral, los álabes directrices, y el tubo de descarga forman el dominio estacionario.

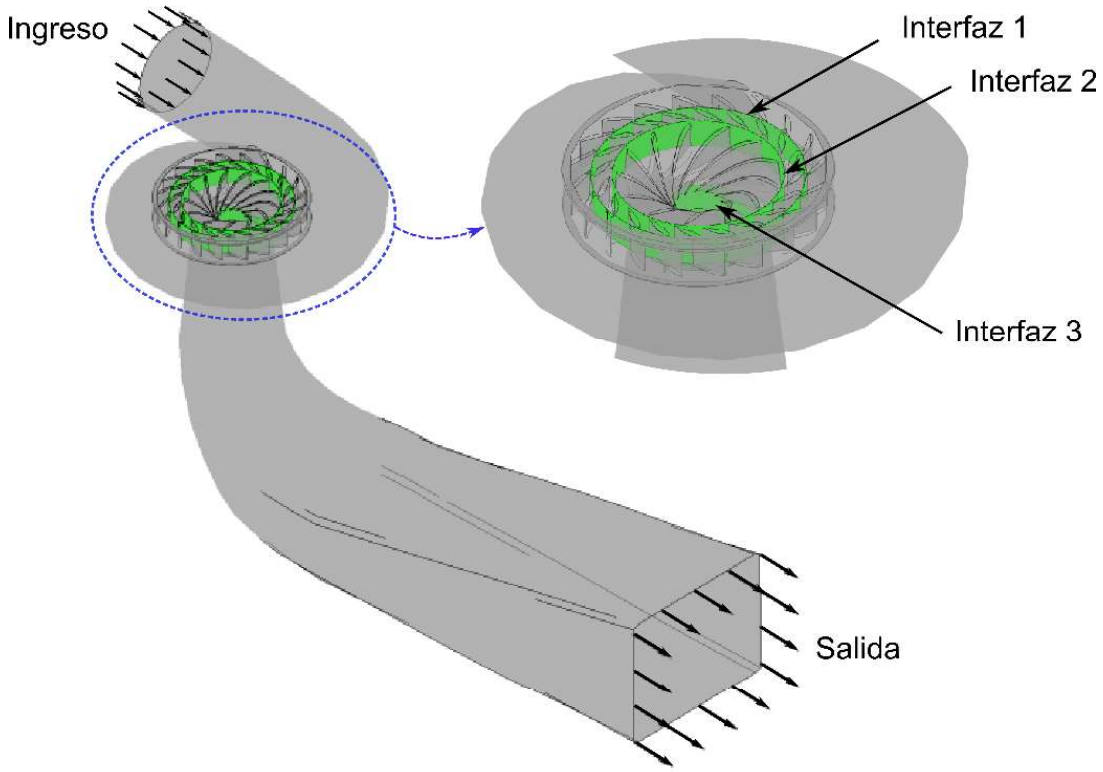



Figura 2.12. Interfaces entre dominios de la turbina tipo Francis
(Fuente: Propia)

La presión total en el ingreso y la salida de presión estática se utilizan como condiciones de contorno como se muestra en la Tabla 2.1, todas las demás partes se consideran como condición de paredes no lisas. El rodete tiene una velocidad de movimiento de 327.27 rpm establecida en un estudio anterior realizado por Mora [3] ver Anexo V y con valores experimentales de operación de la turbina presente en ese trabajo de referencia con condiciones del fluido para la simulación y condiciones físicas representadas en las Tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1. Condiciones de fluido para la simulación

| Condición | Tipo | Símbolo | Valor |
|---|---|---|---|
| INLET | Presión total $[Pa]$ | $P_t$ | $2133655{,}96$ |
| OULET | Presión estática $[Pa]$ | $P_{es}$ | 700000 |
| GRAVITY | $[m/s^2]$ | G | 9,777 |
| MATERIAL | Agua | - | |
| INTERFACES MALLAS | GGI | - | |
| BOUNDARY TYPE | Wall | - | |
| TURBULENCE | K-Épsilon | - | |

(Fuente: [3])

Tabla 2.2. Condiciones físicas de fluido

| Parámetro | Símbolo | Valor |
|---|---|---|
| Temperatura del agua [℃] | $T$ | $16$ |
| Densidad del agua $[\boldsymbol{Kg/m^3}]$ | $\boldsymbol{\rho}$ | 999,85 |

(Fuente: [3])

En aplicaciones de ingeniería para lograr la convergencia de la solución a un nivel aceptable, el residual generalmente se establece entre cuatro a seis órdenes de magnitud más bajos que los valores reales [19]. Se utiliza métodos iterativos para resolver el sistema correspondiente de ecuaciones algebraicas, que permite caracterizar la precisión de la solución de aproximación mediante el análisis residual. En este estudio, los residuos de RMS se establecieron en un valor de estado estable dentro de 300 iteraciones. Los criterios de convergencia para los parámetros de masa, momento y turbulencia se establecieron en una raíz cuadrada media (RMS) con un valor entre $10^{-4}$ y $10^{-5}$.

## 2.7. Condiciones de simulación en estado inestable

Los dominios necesarios de la turbina considerados estacionarios son la caja espiral, los álabes directrices y el tubo de descarga mientras que el rodete se considera rotacional similar al inicio en condiciones estables. En este caso particular, el modelo de turbulencia usado es de dos ecuaciones: Shear Stress Transport SST y se considera un criterio de convergencia del máximo $10^{-5}$ con un esquema de alta resolución con un número de bucles internos establecido en 10.

Se requiere capturar los efectos hidráulicos no estacionarios que influyen sobre el comportamiento de la turbina, en particular la interacción rotor-estator. Esta interacción es un fenómeno generado por el fluido a través de los álabes directrices, distribuidor y del rodete en una turbina Francis, este fenómeno se refleja físicamente en las fluctuaciones de presión a lo largo de los diferentes componentes. A medida que el fluido ingresa a un canal del rodete, se generan tres efectos:

- Variación en su presión estática
- Está sujeto a variaciones en los ángulos de incidencia.
- La magnitud de la velocidad que pasa alrededor de los álabes varía.

La interacción rotor-estator se representa en la Figura 2.13 las interfaces entre la salida del dominio de los álabes directrices y la entrada del rodete requiere esta interacción, además las interfaces en la salida del rodete y el ingreso del tubo de descarga.

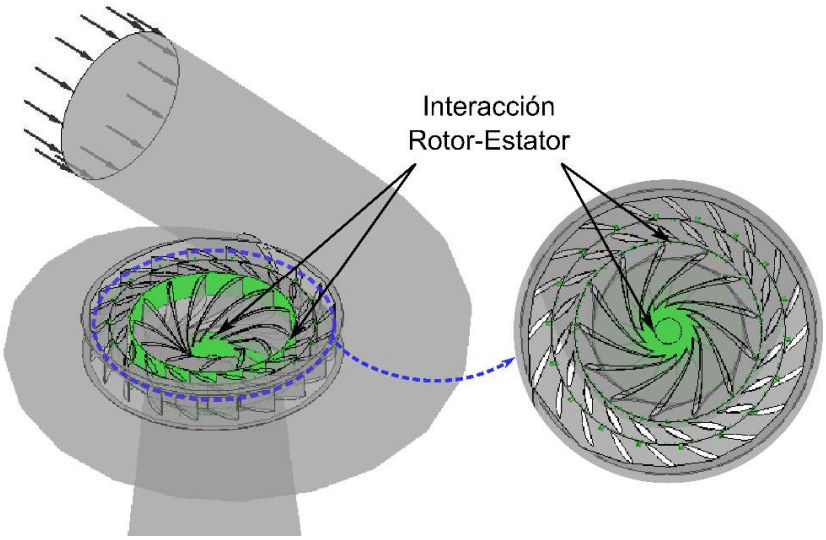



Figura 2.13. Interacción Rotor - Estator
(Fuente: Propia)

Un tiempo de $1.18x10^{-3}$ s representa el desplazamiento rotacional del rodete en 2°. La simulación tiene una duración equivalente al tiempo de 0.1833 s que demora el rodete en girar una vuelta con condiciones iniciales desde el origen. Esta configuración del Solucionador se resume en la Tabla 2.3

Tabla 2.3. Configuración para simulación en CFX

| **Tipo de simulación** | **Inestable** |
|---|---|
| Tiempo total | 0.1833 s |
| Paso de tiempo | $1.18x10^{-3}$ s |
| Tiempo inicial | 0 s |
| Modelo de turbulencia | SST |
| Criterio de convergencia | RMS |

(Fuente: Propia)

# 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 3.1. Optimización de mallado

En la generación de mallado es importante la relación que existe entre el número de elementos con el número de nodos, la razón radica en que su valor adimensional es proporcional al recurso computacional requerido para las simulaciones. La ecuación 3.1 determina el valor adimensional de esta relación definida como un número omega [2].

$$\Omega = \frac{NE}{ND}$$

Ecuación 3.1

Donde:

$NE$: es el número total de elementos.

$ND$: es el número total de nodos.

Tabla 3.1. Relación entre los números de elementos con los números de nodos de cada subdominio

| Dominio computacional | Número de elementos | Número de nodos | Omega Ω |
|---|---|---|---|
| Caja espiral | 691628 | 655941 | 1,054 |
| Álabes directrices | 1210544 | 1112400 | 1,088 |
| Rodete | 902045 | 845025 | 1,067 |
| Tubo de descarga | 121816 | 114072 | 1,068 |
| **Total** | **2926033** | **2727438** | **1,072** |

(Fuente: Propia)

La Tabla 3.1 representa la relación entre los números de elementos con los números de nodos para cada subdominio de la turbina y el total empleado en el domino de la turbina generado con elementos hexaédricos con valores muy cercanos a 1 con mayor homogeneidad entre elementos y nodos.

La Tabla 3.2 representa el porcentaje de reducción de elementos que relaciona la cantidad anterior realizada por Mora presente en el Anexo VI, máxima y actual definida por la ecuación 3.2:

$$\%Red. = \frac{NAT - NAC}{NMAX}$$

Ecuación 3.2.

Donde:

$NAT$: es el número de elementos anteriores.

$NAC$: es el número de elementos actuales.

$NMAX$: es el número de elementos máximos.

Tabla 3.2. Porcentaje de reducción de elementos

| Dominio computacional | NAT | NAC | % Reducción |
|---|---|---|---|
| Caja espiral | 3653946 | 691628 | 0.811 |
| Álabes directrices | 54857919 | 1210544 | 0.978 |
| Rodete | 8984538 | 902045 | 0.899 |
| Tubo de descarga | 960146 | 121816 | 0.873 |

(Fuente: Propia)

Tabla 3.3. Comparación del valor omega entre dos tipos de mallado.

| Tipo de mallado | Número de elementos | Número de nodos | Omega Ω |
|---|---|---|---|
| No estructurado | 68456549 | 13120572 | 5,211 |
| Estructurado | 2926033 | 2727438 | 1,072 |

(Fuente: Propia)

Mora realiza un estudio con una malla no estructurada [3] y los valores obtenidos se indican en la Tabla 3.3, existe una reducción representada por el número omega lo que implica menor tiempo computacional, el tipo de mallado no estructurado limita el control de los elementos que se adhieran en zonas muy pequeñas incrementando los elementos necesarios y en ocasiones inducen resultados, un ejemplo evidente está en la caja espiral que tiene una geometría muy aguda y en el rodete donde se concentran los elementos tetraédricos a través del canal hidráulico como se muestra en el Anexo VII. Esta acumulación de elementos y la distorsión generada en los elementos se previenen con elementos hexaédricos, lo que permite una reducción de elementos presentes en la Tabla 3.2, los valores cercanos a 1 presentan mayor reducción y se relacionan con el número omega en su valor adimensional que también presenta una interesante optimización cuando los valores se aproximan a uno.

En referencia a un estudio realizado por Huamaní & Braga en una turbina tipo Francis con características similares en estado estable con un tipo de malla estructurada y no

estructurada, con condiciones de simulación similares descritas en el Anexo VIII, el tiempo empleado para la simulación que se presenta es de 30 horas [20] a diferencia del tiempo en este estudio que es alrededor de 15 horas. Evidenciando resultados y una convergencia rápida a la utilizada con elementos tetraédricos.

## 3.2. Simulación computacional

### 3.2.1. Resultados de la simulación en estado estable

Los resultados obtenidos en el software ANSYS CFX para la turbina Francis de este estudio se muestran en las Figura 3.1, utilizando un tipo de mallado estructurado en todos los subdominios, a diferencia de un estudio previo realizado [3], con elementos no estructurados representados en el Anexo IX para la Figura (a) velocidad (b) presión (c) presión en una vista superior y (d) perfil de presión de las paletas del rodete, para los dos casos los resultados son la velocidad y la presión descritas por un plano que atraviesa por el eje central del rodete. Para el caso 1 se considera todos los resultados obtenidos con mallado no estructurado y para el caso 2 los resultados de este estudio aplicando una malla estructurada.

Existe una diferencia entre los resultados obtenidos con una malla estructurada y no estructurada entre la sección de la entrada de los álabes directrices y la salida del rodete, representadas en la Figura 3.1 y la Figura (a) del Anexo IX, donde se observa que la velocidad en esta zona es mayor para los casos, con una diferencia en el caso 1, donde en la salida del rodete la velocidad aumenta en la paredes del tubo de descarga continuamente hasta la parte inferior y en el caso 2 aumenta en una zona más amplia desde las salidas de las paletas del rodete y su valor va decreciendo hasta la parte inferior del tubo de descarga representadas en la Figura 3.1.

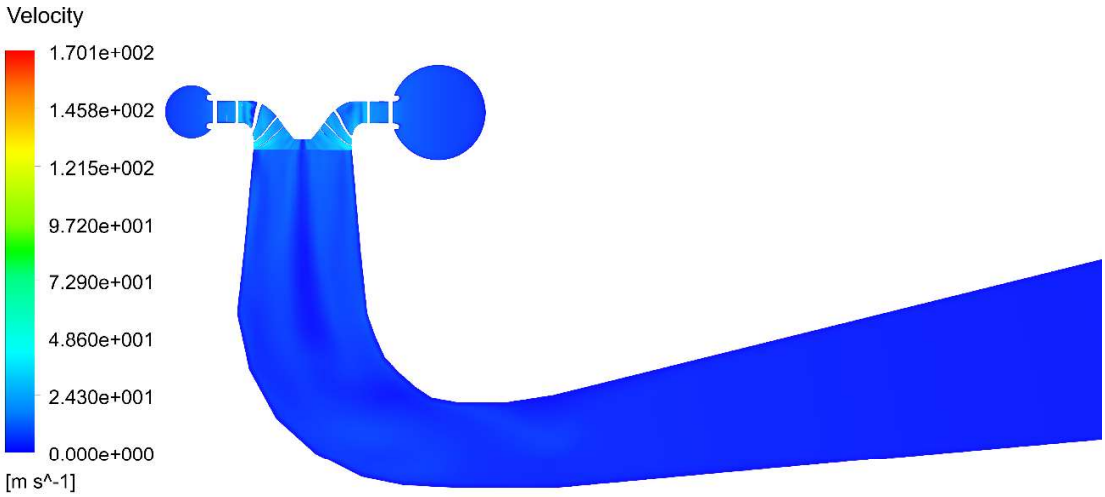



Figura 3.1. Resultado de la simulación en CFX del perfil de velocidad
(Fuente: Propia)

El detalle de los contornos y la distribución de la velocidad del fluido se observa en la Figura 3.2, la velocidad aumenta en esta zona desde la entrada de los alabes directrices a un valor aproximado de 24 m/s hasta un valor aproximado de 45 m/s llegando a un valor máximo aproximado de 55 m/s en el final de las paletas y el cambio es ocasionado por la rotación de la Turbina durante la generación, la componente de velocidad tangencial disminuye en la paleta en el borde delantero lo que se debe a la curva pronunciada del flujo en la regiones de estancamiento cerca de las paletas y a través de la interfaz rodete - tubo de descarga la velocidad decrece a lo largo del tubo de descarga. La distribución de velocidad requiere un flujo de aceleración elevada por lo que se tiene una distribución de presiones a la entrada de los alabes fijos mayor que a la salida del rodete y en estos sectores es donde se presentan distintos tipos de efectos hidráulicos como turbulencias que intervienen en la eficiencia, funcionamiento y condiciones de operación [3].

Figura 3.2. Vista de detalle del perfil de velocidad desde la entrada de los álabes directrices hasta la salida del rodete
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.3 se observa la distribución total (presión dinámica + presión estática) sobre un plano que atraviesa el centro del eje del rodete. Es evidente la reducción de la alta presión en la entrada de la caja espiral a una presión más baja en el tubo de descarga, la presión mayor o presión inlet ingresada en el solucionador con un valor de 2133655,96 Pa, atraviesa los dominios de lo álabes directrices y el rodete llegando a una presión menor en toda esta zona y hasta llegar a la presión de salida o outlet de 700000 Pa.

Para el caso 1 en la Figura (b) del Anexo IX existe una presión muy elevada en la parte inicial de las paletas del rodete y existe un crecimiento no continuo en las paredes del tubo de descarga, además se evidencian valores negativos en la zona central inferior del rodete, a diferencia del caso 2, que se utiliza una malla estructurada donde el cambio de presiones

de esta zona es continua en los dominios que atraviesa el fluido, esta misma característica se puede observar en otro estudio previo [21]. Y la distribución de presiones presenta una forma similar a la descrita en este estudio y en la Figura 3.3.

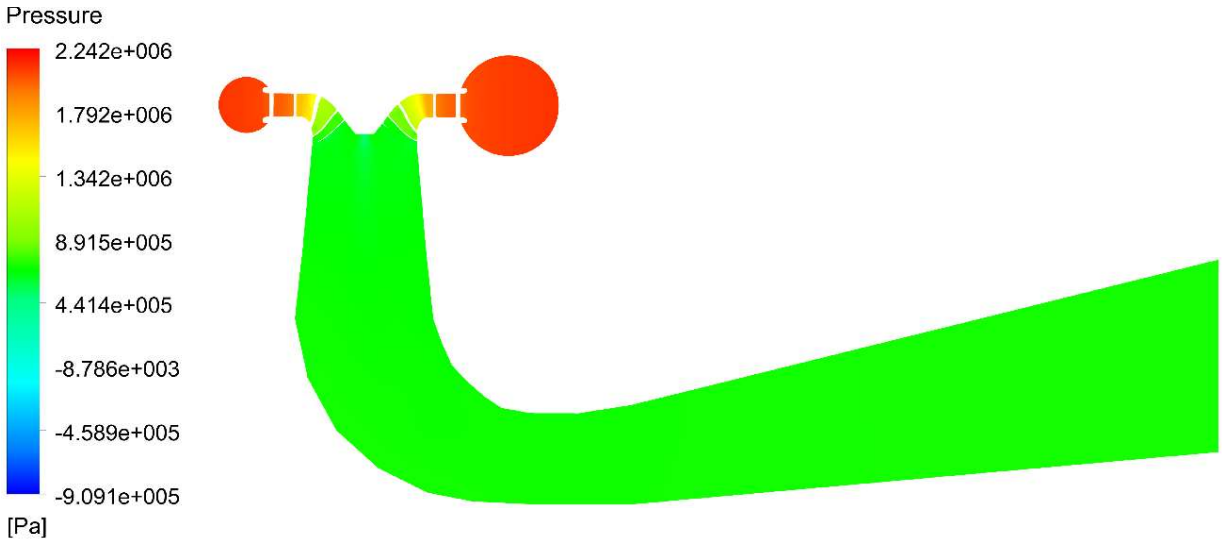



Figura 3.3. Resultado de la simulación en CFX del perfil de presión
(Fuente: Propia)

La presión desde los álabes fijos hacia la caja espiral tiene un valor mayor aproximado de 1,8 MPa, hasta llegar a la presión de entrada de 2,13 MPa, se observan altas magnitudes de presión en los bordes delanteros de la caja espiral debido a la presión de estancamiento en las paletas del rodete, la reducción de la presión en el lado de succión de la paleta del rodete se explica por mayores magnitudes de la velocidad en el borde posterior. Además, las diferencias de presión con respecto a la presión y el lado de succión son altas y estas diferencias generan el par en el eje.

Figura 3.4. Vista de detalle del perfil de presión desde la entrada de los álabes directrices hasta la salida del rodete
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.5 se observa una vista superior de la distribuciones de presiones en un plano transversal que atraviesa la mitad del rodete, los álabes directrices y la caja espiral, para el caso 1 la Figura (c) del Anexo IX se observa menores presiones en el centro del contorno del rodete con un valor aproximado de 0,4MPa y la distribución no es uniforme a lo largo de las paletas del rodete a diferencia del Caso 2 que presenta un valor aproximado 1,1 MPa, y la distribución es continua hasta llegar hasta las paredes del domino de los alabes directrices.

En la Figura 3.5, se puede observar el flujo simétrico hacia la caja espiral en dirección circunferencial, lo que resulta en una presión de distribución simétrica a partir de la distribución uniforme del flujo de la entrada de la caja espiral.

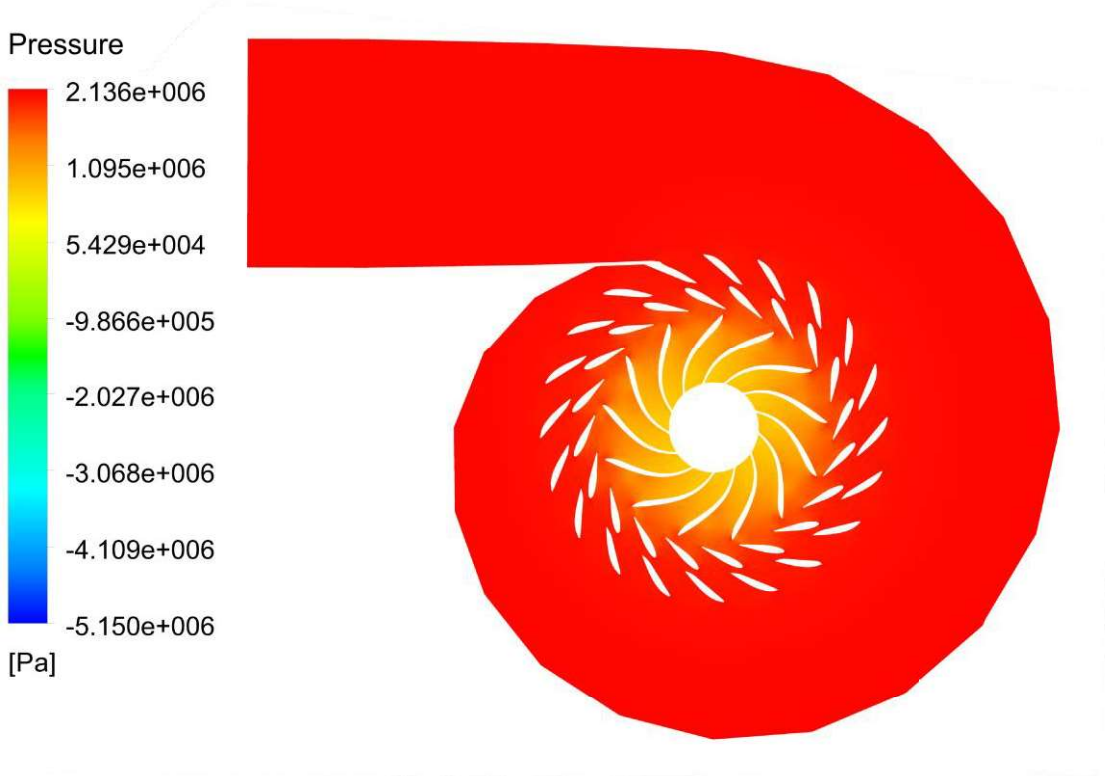



Figura 3.5. Perfil de la presión del fluido en una vista superior
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.6 se observa la distribución de presiones en las superficies de las paletas del rodete, para los 2 casos de la Figura (d) del Anexo IX y la Figura 3.6 se puede deducir visualmente que las zonas con una presión alta están en el ingreso del rodete hasta la tercera parte de las paletas, por lo que son zonas que van a tener mayores esfuerzos. Con estos valores de presión en las superficies de las paletas del rodete se puede calcular el torque a través de una expresión (Torque_Z()@Blades), lo cual es útil más adelante para determinar la eficiencia de la turbina Francis y su validación experimental.

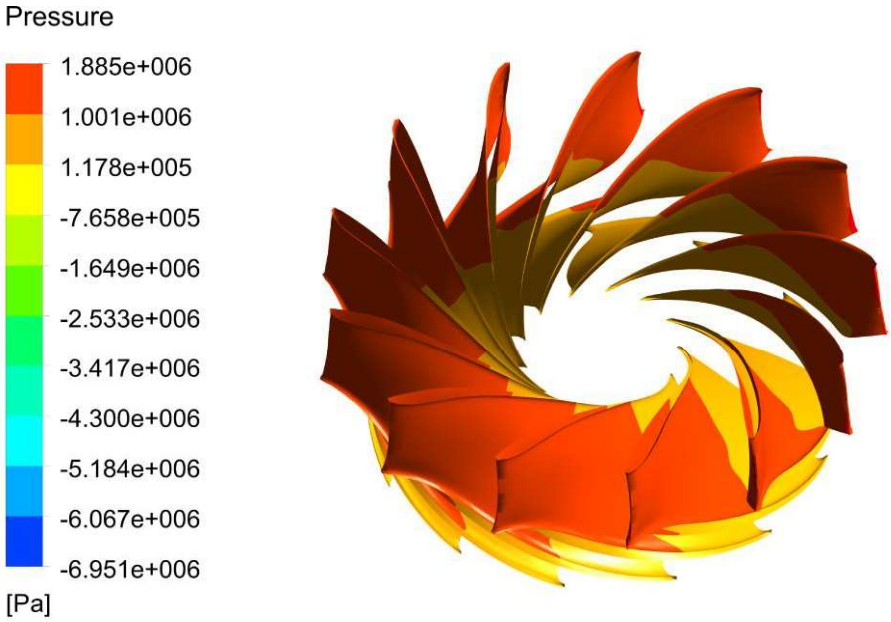



Figura 3.6. Perfil de la presión del fluido en las superficies de las paletas del rodete (Fuente: Propia)

En la Figura 3.7 representa el valor del coeficiente de presión adimensional de una línea de corriente (streamline) a lo largo de todos los dominios de la Turbina Francis, el valor de este coeficiente se define a través de la ecuación 3.3 [22, 4] , la expresión para el solucionador se presenta en el Anexo X.

$$C_p = \frac{p - \bar{p}}{\frac{1}{2}\rho U^2}$$

Ecuación 3.3.

Donde:

$C_p$, coeficiente de presión.

$p$, valor de la presión en un punto [Pa].

$\bar{p}$, promedio de la presión en el intervalo analizado.

$\rho$, densidad [$Kg/m^3$].

$U$, velocidad tangencial del rodete [$m/s$]

La Figura 3.7 representa la distribución de presiones de la streamline en su recorrido, se observa que la presión de ingreso a la caja espiral disminuye hasta los 63m dimensionales y una parte de la energía de presión es transformada en energía cinética en este recorrido con los álabes directrices, posterior a los 63m y 128m se localiza en el rodete y absorbe la energía del fluido transfiriéndole al eje, esta transformación de energía de presión puede presentar valores por debajo de la presión atmosférica a la salida del rodete,

recuperándose hasta alcanzar los valores de presión atmosférica en el tubo de descarga presentando un recorrido entre 128m y 218m.

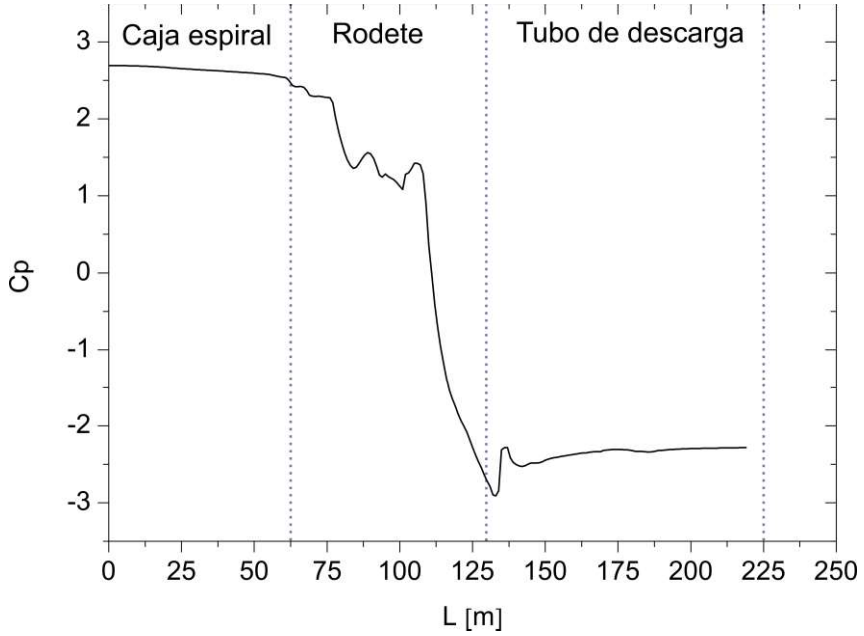



Figura 3.7. Coeficiente de presión en una línea de corriente
(Fuente: Propia)

La Figura 3.8 representa la velocidad adimensional a lo largo de una línea de corriente (streamline) que a traviesa todos los dominios y está definida por la ecuación 3.4., la expresión para el solucionador se presenta en el Anexo X, este valor representa características de desaceleración y aceleración del comportamiento del flujo.

$$V_a = \frac{v}{\bar{v}}$$

Ecuación 3.4.

Donde:

$V_a$, velocidad adimensional.

$v$, valor de la velocidad en un punto $[m/s]$.

$\bar{v}$, promedio de la velocidad en el intervalo analizado.

La Figura 3.8 representa la distribución de velocidades recorriendo hasta los 50m dimensionales se observa que existe una tendencia de incremento de velocidad, posterior a 50m y 150m se encuentra en el rodete y la velocidad aumenta por lo cual en este punto al incrementar la masa existe un intercambio de energía que se puede transmitir en este intervalo. A lo largo de la estructuración del rodete la velocidad disminuye para iniciar el recorrido por el tubo de descarga y se observa que la tendencia en este intervalo de 150m a 250m pretende llegar a cero.

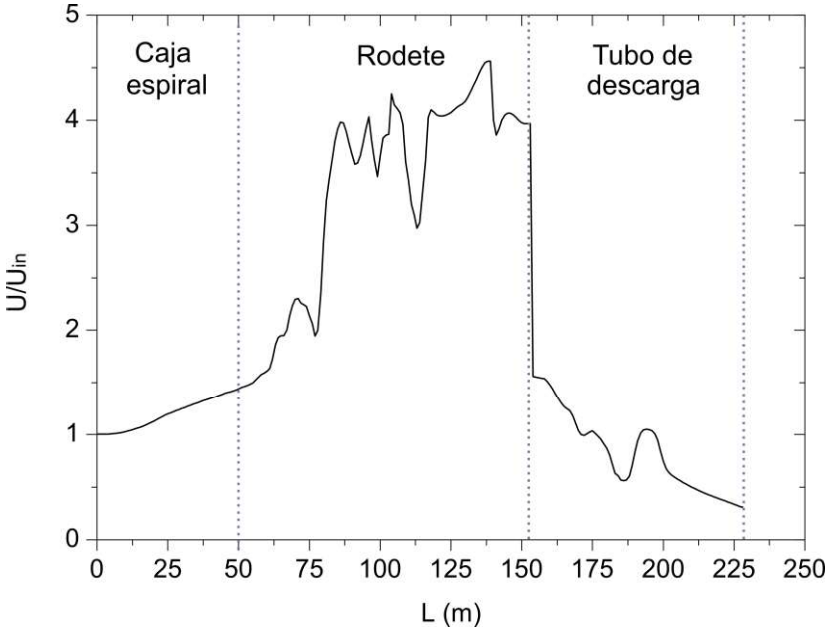



Figura 3.8. Velocidad adimensional en una línea de corriente
(Fuente: Propia)

### 3.2.2 Resultados de la simulación en estado inestable

La Figura 3.9 representa la distribución de velocidades en un t=0.061s a 120° de rotación y a un t=0.182s a 360°, se observa la interacción del rodete con el tubo de descarga, donde en las paredes existe un incremento de velocidad en dirección a la salida del rodete a diferencia de la Figura 3.1. En estado estable esta característica se direcciona de forma lineal. El perfil de velocidad axial cerca de la línea central está formado por la zona de recirculación del rodete, y en las proximidades de las paredes del tubo de descarga.

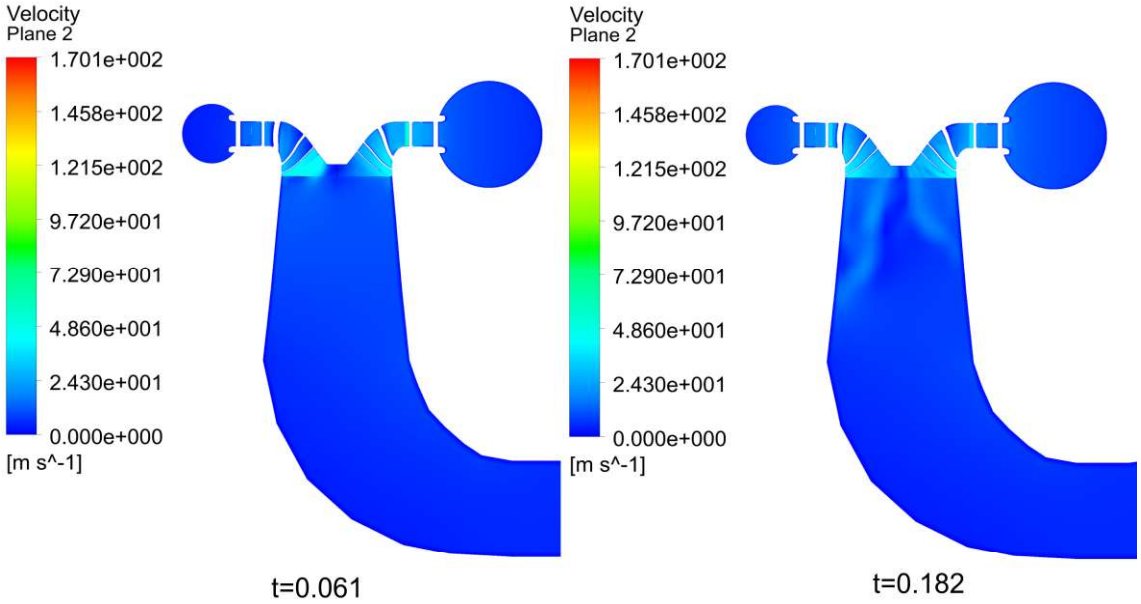



Figura 3.9. Resultado de la simulación en CFX del perfil de velocidad para un t=0.061 s y t=0.182 s
(Fuente: Propia)

La distribución de presiones para un t=0.014 s a 30° y un t=0.182 s a 360° se muestra en la Figura 3.10, el área de succión de la caja espiral es visible y la presión actúa en las paletas del rodete contribuyendo a la trasformación de energía en esta zona. La Figura 3.3 en estado estable presenta una presión más baja en la sección trasversal del recorrido de la caja espiral a diferencia de la Figura 3.10 llega a su valor máximo de 2.24 MPa.

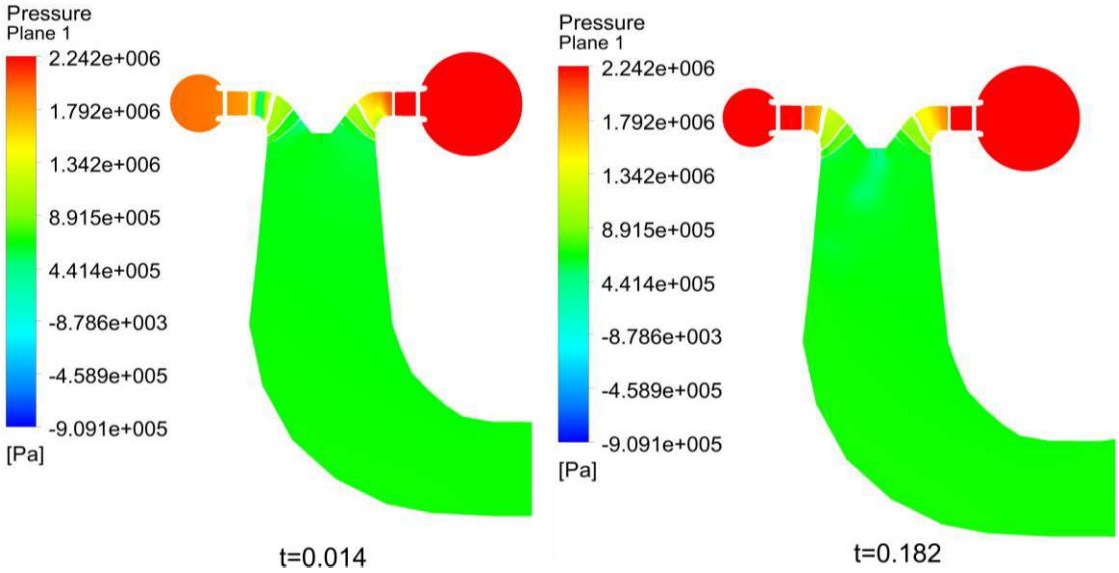



Figura 3.10. Resultado de la simulación en CFX del perfil de presión para un t=0.014 s y t=0.182 s (Fuente: Propia)

Una sección trasversal del rodete muestra la distribución de presiones alrededor de las paletas en la Figura 3.11, para un t=0.182 s la interacción con los álabes directrices es similar a la Figura 3.5. En estado estable una distribución continua alrededor de cada paleta es visible resultado de la trasformación de energía del fluido.

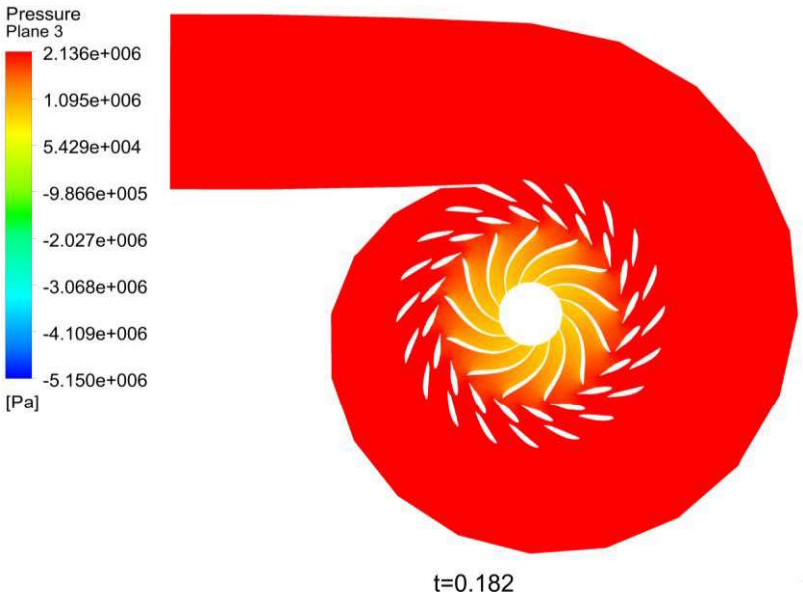



Figura 3.11. Perfil de la presión del fluido en una vista superior para un t=0.182 s (Fuente: Propia)

Los resultados de las simulaciones en estado inestable permiten calcular la variación de la presión en cualquier punto determinado en un intervalo de tiempo de una revolución (t=0.1833s). Este tipo de estudio en estado inestable es importante porque se puede comparar los resultados experimentales con los obtenidos por simulación numérica, se ubican los sensores y ambos datos se llevan a una misma referencia utilizando el coeficiente de presión adimensional [22]. Esta metodología no aplica a este trabajo porque no existen sensores disponibles a través de la turbina en estudio, pero los valores de los coeficientes son presentados en diferentes puntos.

La Figura 3.12 representa la localización de los puntos de monitoreo definidos de la siguiente forma para P1 se encuentra en el ingreso de la caja espiral, para P2 al inicio del rodete entre dos álabes directrices, para el P3 en la mitad del rodete entre dos paletas consecutivas y un P4 se encuentra a la salida del rodete e inicio del tubo de descarga.

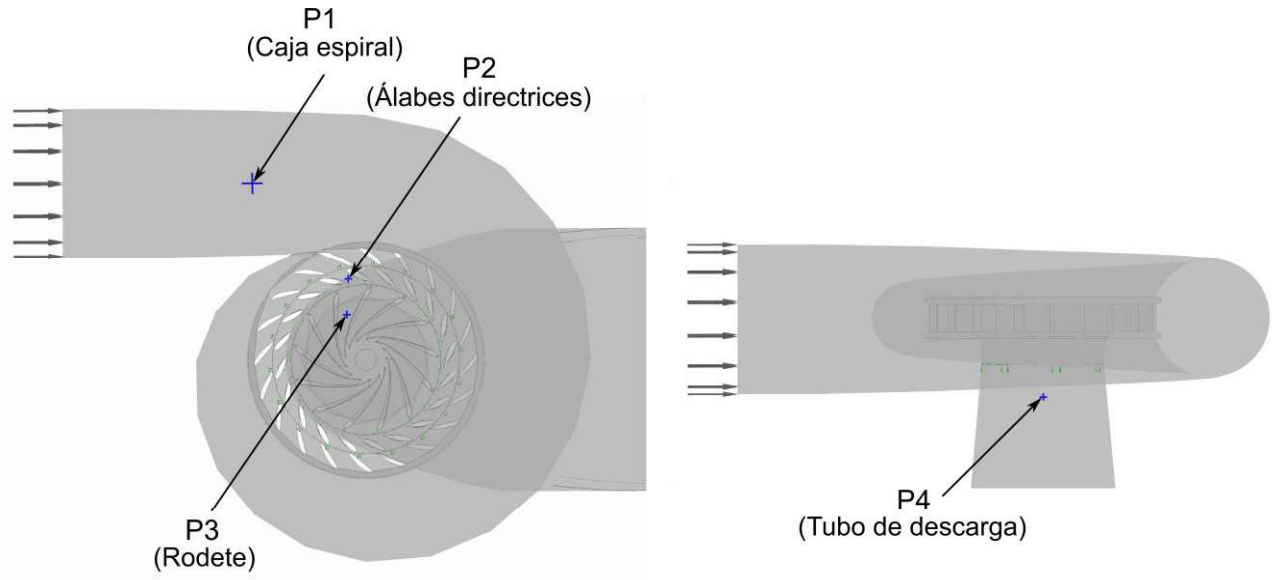



Figura 3.12. Puntos de coeficientes en los dominios de la turbina tipo Francis
(Fuente: Propia)

Para obtener el coeficiente de presión se ingresan expresiones CFD post representadas en la Figura X.4.1 del Anexo X, las expresiones tienen un orden para llegar a una expresión final donde se necesita de variables definidas en los puntos anteriores y a través de la ecuación 3.3 se obtienen valores en un intervalo de tiempo [4].

El coeficiente de presión para el P1 ubicado en la caja espiral se muestra en la Figura 3.13 se observa la evolución temporal e inicia con fluctuaciones irregulares hasta t= 0.11s hasta completar el ingreso del fluido, a continuación ingresa  a una zona periódica 1 donde el

valor de la presión tiene una tendencia descendente hasta t=0.15s llegando a otra zona periódica 2 donde las oscilaciones se mantienen en un rango de presiones continuas.

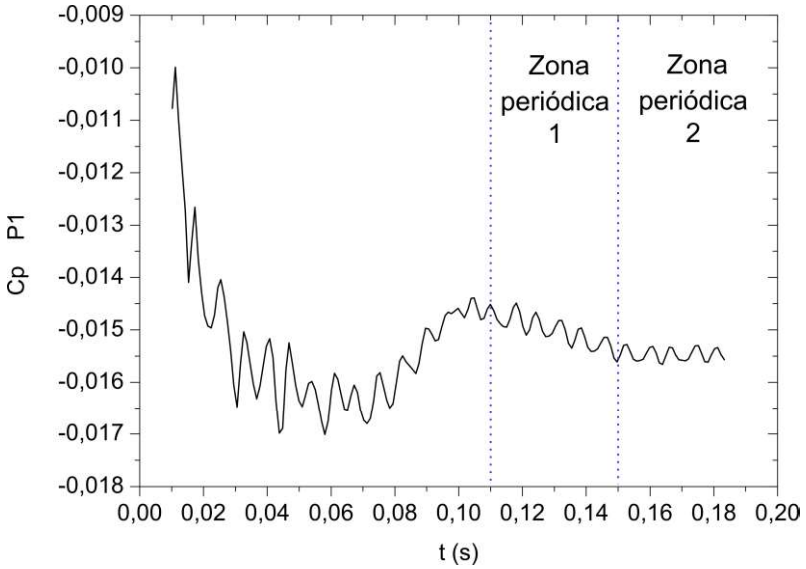



Figura 3.13. Coeficiente de presión en el punto 1
(Fuente: Propia)

El coeficiente de presión para el P2 ubicado entre dos álabes directrices se muestra en la Figura 3.14, los valores de presiones muestran un incremento hasta t=0.11s donde el fluido presenta carga sobre las paredes de los álabes, después comienza una zona periódica con una repentina aceleración del flujo hacia la turbina, el movimiento hacia adelante y hacia atrás de las ondas de presión y las oscilaciones generadas en la superficie inicial del rodete podrían ser las causas de las fluctuaciones de presión.

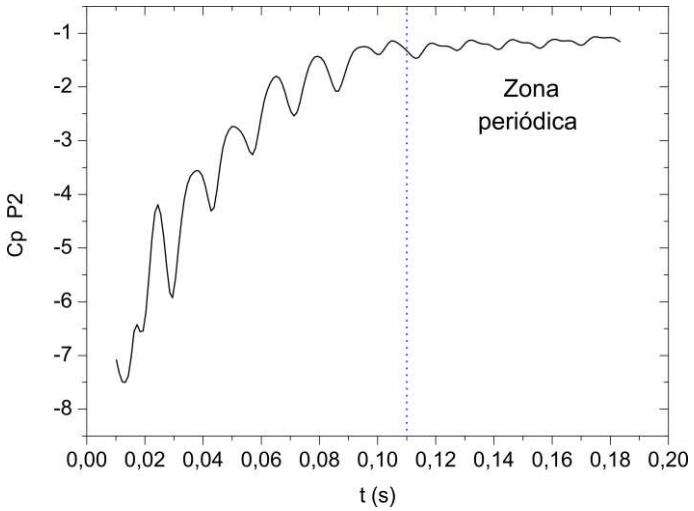



Figura 3.14. Coeficiente de presión en el punto 2
(Fuente: Propia)

El coeficiente de presión para el P3 se muestra en la Figura 3.15 ubicado en el rodete, se observa el incremento de presión hasta t=0.09s donde inicia una zona periódica y las

oscilaciones de presión son inducidas por fenómenos inestables, como la rotura de una cuerda de vórtice dentro del rodete y el tubo de descarga, un estudio realizado por Mun et al indica el grado de conversión de la energía cinética a la presión estática donde un valor más alto significa una mayor eficiencia para el rodete bajo un análisis de Cp [23].

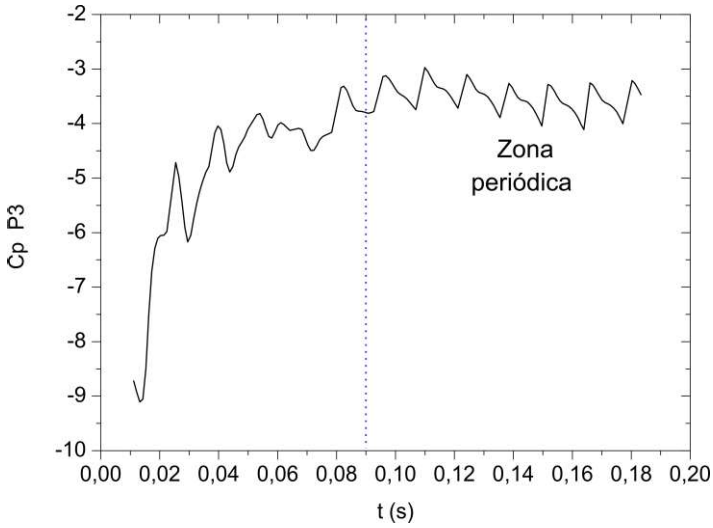



Figura 3.15. Coeficiente de presión en el punto 3
(Fuente: Propia)

El coeficiente de presión para el P4 ubicado al ingreso del tubo de descarga se muestra en la Figura 3.16, se evidencia un incremento de presión hasta un valor máximo en t=0.104s y se observa la inestabilidad periódica del fluido, el fluido separado recircula de nuevo al fluido ascendente, se encuentra con el flujo entrante y forma un punto de separación, las oscilaciones son irregulares durante el tiempo de simulación. El coeficiente de presión es una de las características integrales del tubo de descarga que permite evaluar la efectividad del difusor curvilíneo y la adecuación de la forma y tamaño bajo las condiciones dadas [24].

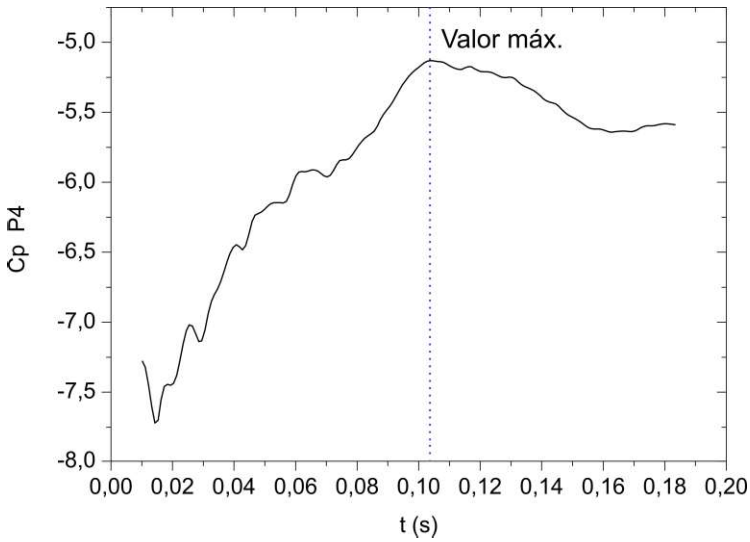



Figura 3.16. Coeficiente de presión en el punto 4
(Fuente: Propia)

El Q-criterion se aplica para la detección de las estructuras de vorticidad, su definición proviene de la diferenciación de la ecuación de Navier-Stokes y fue aplicada por primera vez por Jeong & Hussain [25]. Q> 0 implica una presión local más pequeña que la presión circundante, las regiones de alto valor Q limitan las zonas de baja presión de acuerdo con Gyllenram et al [26] y las estructuras de vorticidad se identifican como regiones de alto valor Q positivo.

La forma de la cuerda de vorticidad a un valor de Q= 815 se presenta en la Figura 3.17 como una iso-superficie de presión promedio de 0.57MPa, la cuerda se rota alrededor del rodete con una forma de un tornillo giratorio. La forma de las líneas de corriente indica la cuerda de vorticidad giratoria dentro del tubo de descarga y la distribución de la presión a lo largo del plano medio del tubo de descarga se muestra en la Figura 3.17 y la región de baja presión generada en el centro del tubo de descarga origina en el flujo un remolino que sale del rodete y la cuerda de vorticidad en el tubo de descarga generalmente se envuelve alrededor de esta región de baja presión.

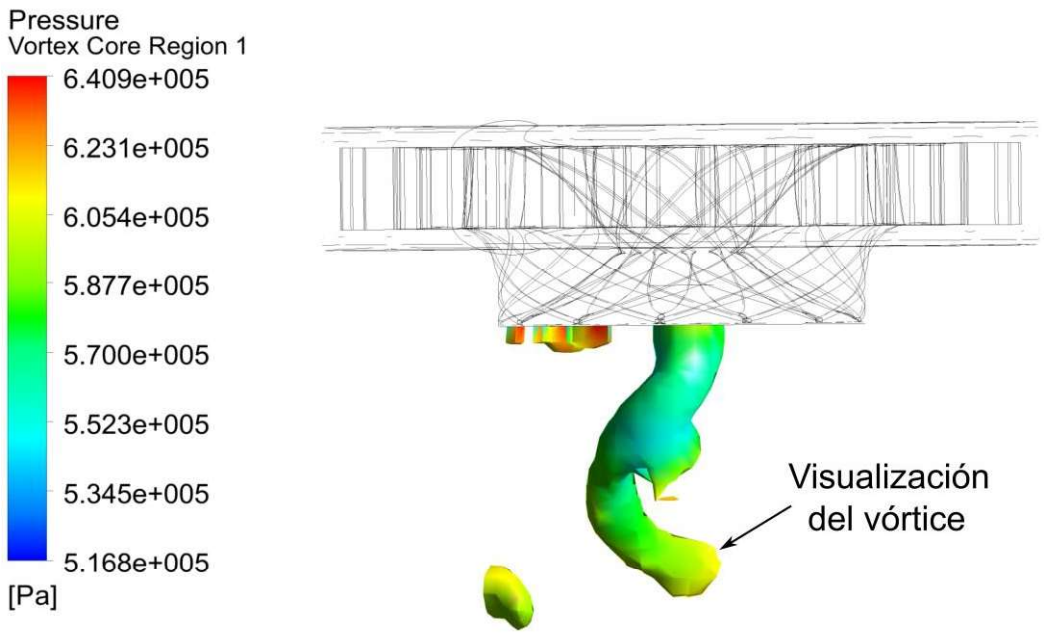



Figura 3.17. Vorticidad bajo Q-criterion a un valor de Q=815
(Fuente: Propia)

## 3.3. Validación experimental

### 3.3.1. Eficiencia a través de expresiones (CFD POST)

Considerando que el rodete genera un par de torsión con una velocidad de rotación en rpm, entonces la potencia obtenida del rodete se puede expresar en la ecuación 3.5:

Potencia de salida=(torque)(velocidad angular)

$$P_{out} = Tw\ [W]$$

Ecuación 3.5.

La entrada de potencia disponible en la turbina se convierte en la ecuación 3.6:

$$P_{in} = \rho g Q H$$

Ecuación 3.6.

Donde:

$P_{in}$: Potencia de entrada a la turbina

$H$: Cabezal total disponible en la entrada de la turbina $[m]$

$\rho$: Densidad del agua $[Kg/m^3]$

$Q$: Caudal volumétrico del agua $[m^3/s]$

$g$: Aceleración gravitacional $[m/s^2]$

Los datos de la turbina se obtienen del trabajo realizado por Mora en el Anexo V y se presenta los valores constantes en la Tabla 3.4 para obtener resultados aceptables que permitan realizar un análisis comparativo.

Tabla 3.4. Valores constantes de la turbina

| **Parámetro** | **símbolo** | **Valor** |
|---|---|---|
| Diámetro entrada caja espiral [m] | Ø | 3.0 |
| Densidad del agua [Kg/m$^3$] | p | 999.95 |
| Altura aguas abajo[m] | Hs | 634 |
| Gravedad [m/s$^2$] | g | 9.81 |
| Caudal [m$^3$/s] | Q | 58 |

(Fuente: Propia)

Durante la conversión de energía (energía hidráulica a energía mecánica o viceversa) se producen algunas pérdidas. Pueden ser de muchas formas y las principales causas son la fricción, la separación y las fugas [27].

Para una turbina:

Potencia de entrada de fluido = (Pérdida mecánica) + (Pérdidas hidráulicas) + (Salida de potencia útil del eje)

Donde:

Pérdidas hidráulicas = (Pérdida del impulsor) + (Pérdida de la carcasa) + (Pérdida por fugas)

Considerando todas las pérdidas como un término se puede expresar la ecuación 3.7:

$$P_{in} = P_{lost} + P_{out}$$

Ecuación 3.7.

Entonces, la eficiencia global de la turbina se convierte en la ecuación 3.8:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{Tw}{\rho g Q H}$$

Ecuación 3.8.

Estas expresiones es posible obtenerlas en CFD Post y en general se pueden utilizar funciones matemáticas, constantes dimensionales, funciones de cantidad integrada y cualquier combinación dimensionalmente consistente. Para obtener la eficiencia de la turbina tipo Francis se ingresan las expresiones a partir de las ecuaciones 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, el flujo de las expresiones se representa en la Figura AX.4.2 del Anexo X donde el orden para llegar a una expresión necesita de variables dependientes considerando la distribución de presiones en las paletas del rodete como importante para la obtención del torque alrededor del eje de rotación del rodete.

El valor obtenido de la eficiencia se realiza a través de múltiples iteraciones para la convergencia que se muestra en la Tabla 3.5 y se concluye que el valor de la eficiencia es de 86.45% comparado con los valores de la Tabla del Anexo V de la eficiencia calculada en campo por un estudio realizado por Mora, los valores son similares y el valor obtenido por Mora a través de un mallado no estructurado es de 80.266% por lo mencionado se puede dar por validado el modelo virtual más eficiente con un mejoramiento de malla para las simulaciones.

Tabla 3.5. Número de iteraciones para la convergencia de la eficiencia

| **Número de iteraciones** | **Eficiencia** |
|---|---|
| 250 | 0,8200 |
| 350 | 0,8561 |
| 400 | 0,8613 |
| 550 | 0,8645 |

(Fuente: Propia)

### 3.3.2. Porcentaje de error en la simulación

El porcentaje de error se determina a partir del valor simulado en relación al valor calculado, la Tabla 3.6 representa valores de la eficiencia obtenida con datos

experimentales, que se muestran en la Tabla del Anexo XI en un informe de rendimiento de la turbina presentado en el trabajo de Mora [3].

Tabla 3.6. Porcentaje de error en una malla estructurada

| Eficiencia experimental | Eficiencia numérica (estructurado) | Error (%) |
|---|---|---|
| 89,14 | 86,45 | 3,02 |

(Fuente: Propia)

Los valores resultantes de las simulaciones y los calculados, se puede determinar el error relativo con la ecuación 3.9:

$$Error = \frac{|(Eficiencia)_{Exp.} - (Eficiencia)_{Num.}|}{(Eficiencia)_{Exp.}} X100\%$$

Ecuación 3.9.

$$Error = \frac{|89.14 - 86.45|}{89.14} x100\%$$

$$Error = 3.02\%$$

En base a la eficiencia obtenida a través de un mallado estructurado el error con una malla no estructurada se reduce casi tres veces, la geometría de la turbina induce la obtención de errores a más de simplificarse para la estrategia de multibloques utilizada en este trabajo. Existen zonas muy densas donde la forma no se adapta adecuadamente a los elementos del mallado. El porcentaje de error puede ser aceptable hasta un 10% [28]

# 4. CONCLUSIONES

En el presente estudio se ha desarrollado una metodología para la generación de un tipo de mallado estructurado para una turbina tipo Francis con características similares a la de la Central Hidroeléctrica San Francisco-Ecuador que forma parte del proyecto de investigación PIJ 17-13, se obtiene un valor de omega de 1,072 con respecto al valor obtenido con un mallado no estructurado realizado por Mora era de 5,22, la reducción tiene la ventaja de utilizar menor recurso computacional con una mejor calidad de mallado con un número de elementos hexaédricos de 2926033. La metodología de multibloques permite un control de malla en las geometrías de mayor complejidad como el rodete y la caja espiral a diferencia del tipo de malla realizada de forma automática que genera un exceso de elementos en estas zonas y pueden inducir errores en los resultados.

La simulación en estado estable genero beneficios en el análisis de presiones y velocidades alrededor de los alabes fijos de la caja espiral, los álabes directrices y la paletas del rodete generando una mejor obtención de la distribución de presión y velocidad. Se evidencia esta característica en las paletas del rodete donde la distribución de presión tiene un mayor alcance en comparación con el resultado obtenido con elementos no estructurados realizado por Mora y estos valores son importantes para la obtención de la eficiencia de la turbina lo que significa un beneficio en la construcción del mallado estructurado. En el trabajo realizado por Mora no se pudo realizar simulación en estado inestable debido a la complejidad de las interfaces generadas para un mallado no estructurado, los resultados en estado inestable para el análisis de velocidades en el ingreso del tubo de descarga presenta una mejor distribución a la obtenida en estado estable, la distribución de presiones en la caja espiral presenta un incremento y los puntos ubicados en cada dominio de la turbina evidencian las oscilaciones de presiones a través del Cp para un t=0.1833s durante una revolución.

El porcentaje de diferencia de error obtenido a partir de la eficiencia experimental del 89,14% se obtiene en la presente simulación un valor del 3,02% que se reduce en un 6,9% en comparación a estudios previos lo que significa una optimización al generar elementos estructurados. La optimización de mallado pemite obtener las cuerdas de vortcidad dentro del tubo de descarga y su forma de tornillo giratorio donde la distribucion de presión a lo largo del plano medio presenta regiones de bajas presiones generando un remolino a la salida del rodete, estas vorticidades no se pudieron generar en el estudio realizado por Mora.

## 4.1. Recomendaciones y Trabajos futuros

En el presente mallado para la simulacion existen diferentes software libre como OpenFOAM que permiten la flexibilidad de funciones creadas por el usuario y seria interesante la aplicación de la turbina a través de esta herramienta.

Para la simulacion en estado inestable se debe considerar un mayor numero de revoluciones que permiten llegar a un intervalo de estabilidad y optimizar el recurso computacional empleado para este análisis.

Se debe considerar un refinamieno de malla en las paredes de los álabes fijos, álabes directrices y paletas del rodete para capturar fenómenos de capa límite en esta zona. Se debería realizar un análisis de y+ para la optimización de mallado previo a la utilización de OpenFOAM como un estudio de cavitación que se puede abordar para un alcance futuro.

## Referencias Bibliográficas


[1] «Balance Nacional de Energía Eléctrica,» ARCONEL, 2019.

[2] V. H. Hidalgo Díaz, X. Luo, A. Peña, E. Valencia, R. Soto y A. Yu, «Benefits of hydropower research in Ecuador using OpenFOAM based on CFD technology,» Quito, 2014.

[3] C. A. Mora Sánchez, «Análisis de la eficiencia de una turbina tipo Francis con características similares a la de la central hidroeléctrica San Francisco-Ecuador,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2018.

[4] I. Sadrehaghighi, Mesh generation in CFD, Annapolis, 2018.

[5] V. Holmén, «Methods for Vortex Identi,» *Semantic Scholar,* 2012.

[6] V. H. Hidalgo Diaz, «Numerical study on unsteady caviting flow and erosion based on homogeneous mixture assupmtion,» Tsinghua University, 2016.

[7] L. Jean Eloi, «Introduction to Structured Grid Generation for Aeronautics,» Interdisciplinary Aerodynamics Group, Lausanne, 2011.

[8] R. Schneiders, «Algorithms for Quadrilateral and Hexahedral Mesh Generation,» magmasoft, Aachen, 2011.

[9] J. Tu, G. Yeoh y C. Liu, Computational fluid dynamics a practical approach, Cambridge: Elsevier, 2018.

[10] A. Alakashi y B. Basuno, «Comparison between Structured and Unstructured Grid Generation on Two Dimensional Flows Based on Finite Volume Method (FVM),» *International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering,* vol. 2, pp. 97-103, 2014.

[11] D. Nymo, «Numerical Simulation of Boundary Layer Flow Around Simplified Subsea Structures,» Department of Marine Technology, Norwegian, 2015.

[12] A. Khare, A. Singh y K. Nokam, «Best Practices in Grid Generation for CFD Applications Using HyperMeh,» *Computational Researh Laboratories,* pp. 1-9, 205.

[13] L. Hou-lin, L. Ming-ming, B. Yu y D. Liang, «Effects of mesh style and grid convergence on,» Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Zhenjiang, 2015.

[14] M. Morgut y E. Nobile, «Comparison of Hexa-Structured and Hybrid-Unstructured Meshing Approaches for Numerical Prediction of the Flow Around Marine Propellers,» de *First International Symposium on Marine Propulsors*, Trondheim, 2009.

[15] J. Tomás, «CFD study of the Rotor-Stator Interaction in a Francis turbine,» Barcelona, 2016.

[16] C. Trivedi, M. Cervantes y B. Gandhi, «Investigation of a High Head Francis Turbine at,» *energies,* pp. 1-18, 2015.

[17] S. Laín, . M. García, B. Quintero y S. Orrego, «CFD Numerical simulations of Francis turbines,» *EAFIT University,* pp. 24-23, 2018.

[18] S. Sujit, «Numerical investigation of micro scale flows in narrow gaps,» Open-Minden, Duisburg, 2014.

[19] S. Lain, M. García, B. Quintero y S. Orrego, Simulación Numérica de Turbinas Francis, Cali: Universidad EAFIT, 2011.

[20] ESSS, «Introdução a Fluidodinâmica Computacional,» *malhas,* pp. 18-19, 2013.

[21] J. Wiley, Numerical Computation of internal and external flows, Brussels: Wiley Jnterscience, 2017.

[22] A. Huamaní y W. Braga, «ESTUDIO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA ESTACIONARIA DEL FLUJO EN EL MODELO DE TURBINA FRANCIS TOKKE, EN DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN,» UNILA, Foz do Iguaçu, 2018.

[23] R. Saeed, V. Popov y A. Galybin, «Complete Francis turbine flow simulation at Derbendikan power station,» *witpress,* vol. 74, pp. 49-57, 2012.

[24] A. Zobeiri, J. Kueny, M. Farhat y F. Avellan, «Pump-Turbine Rotor-Stator Interaction in Generating Mode: Pressure Fluctuation in Distributor Channel,» EPFL, Lausana, 2006.

[25] M. Chol, D. Ba, X. Yue y M. Kim, «Multi-objective Optimization of Draft Tube in Francis Turbine Using DOE, RBF and NSGA-II,» *School of Mechanical Engineering & Automation,* pp. 2-13, 2017.

[26] Y. Bykov y J. Steller, «Numerical modelling of flow in the draft tube of a hydraulic turbine,» *Institute of Mechanical Engineering Problems of the Ukrainian National Academy,* pp. 1-9, 2002.

[27] J. Jeong y F. Hussain, «On the identification of a vortex,» Cambridge University Press, Houston, 1995.

[28] W. Gyllenram, H. Nilsson y L. Davidson, «On the failure of the quasicylindrical approximation and the connection to vortex breakdown in turbulent swirling flow,» 2007.

[29] J. Douglas, Y. Çengel y J. Cimbala, «FRANCIS TURBINE EXPERIMENT,» Pearson.

[30] V. Hidalgo, X. Luo, X. Escaler, B. Ji y A. Aguinaga, «Implicit large eddy simulation of unsteady cloud cavitation around a plane-convex hydofoil,» ScienceDirect, Beijing, 2015.

[31] H. Kapoor, «Open source mesh generation and CFD simulations for Francis Turbine,» Chalmers University of Technology, Goteborg, 2014.

[32] B. Molnár, «Comparasion of structured and unstructured mesh for the computations of an H-type darrieus wind turbine,» University of Miskolc, Magdeburg, 2014.

[33] X. Zhang, Q. Chen y J. Liao, «Dynamic evolutions between the draft tube pressure pulsations and vortex ropes of Francis turbine during runaway,» *J-STATE,* vol. 10, pp. 404-411, 2017.

[34] J. Hunt, A. Wray y P. Moin, «Eddies, Streams, and Convergence Zones in Turbulent Flows,» *Center for Turbulence Research CTR-S88,* pp. 193-208.

[35] V. Kolár, «Vortex identification: New requirements and limitations,» *International Journal of Heat and Fluid ,* pp. 638-652, 2007.

[36] C. Sideroff, Multi-Block Structured Meshing and Pre-Processing for OpenFOAM Turbomachinery Analysis, PointWise.

[37] Fluent, «Meshing and CFD Accuracy,» June 2005.

[38] A. Mesquita y C. Blanco, «Minimum pressure coefficient criterion applied in axial-flow hydraulic,» Federal University of Pará, Belém, 2007.

# ANEXOS

## Anexo I. Metodología de mallado de la caja espiral.

La geometría de la caja espiral se simplifica con la eliminación de curvas sobre las paredes externas y sustitución de superficies al final de la zona decreciente del dominio, se definen tres zonas de mallados que requieren la creación de distintas topologías a lo largo de esta y deben conectarse entre sí, como se muestra en la Figura AI.4.1 la zona 1 presenta una geometría circular casi uniforme reduciéndose con el paso, la zona 2 está unida a los álabes fijos con canales adyacentes a los lados y la zona 3 la continuación de la anterior zona es el final de la caja espiral con geometrías agudas que pierden continuidad en la punta final.

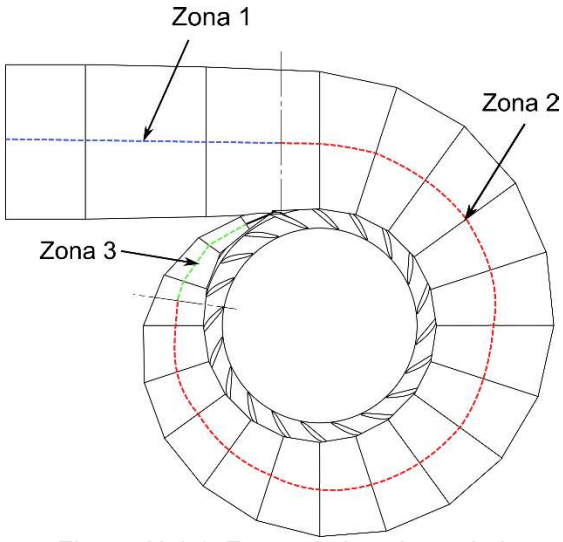



Figura AI.4.1. Zonas de la caja espiral

(Fuente: Propia)

La topología de cada zona es mallada de forma independiente para estudiar y verificar la forma de los bloques a utilizarse en todo este dominio como se muestra en la Figura AI.4.2. (a) muestra el inicio de la caja espiral definida por una forma circular hasta el inicio de la segunda zona, los bloques tienen una topología O-grid hasta la conexión de la zona 2 donde se colapsa, se divide y se eliminan bloques para satisfacer la conexión entre estas zonas obteniendo una calidad de malla mínima de 0.3 bajo el criterio Quality.

Figura AI.4.2. (b) señala un álabe fijo que representa una parte de la zona 2 adherida en el volumen de control, su topología se construye a partir de un bloque inicial y a continuación se divide y eliminan bloques con una calidad de malla mínima de 0.4 bajo el criterio Quality.

La zona 3 está representada en la Figura AI.4.2. (c) con una topología degenerada y colapsada a partir de un O-grid donde el volumen que es muy agudo requiere asociaciones

de las caras de los bloques hacia la superficie del volumen para obtener una malla aceptable con una calidad mínima de 0.3 bajo el mismo criterio de calidad.

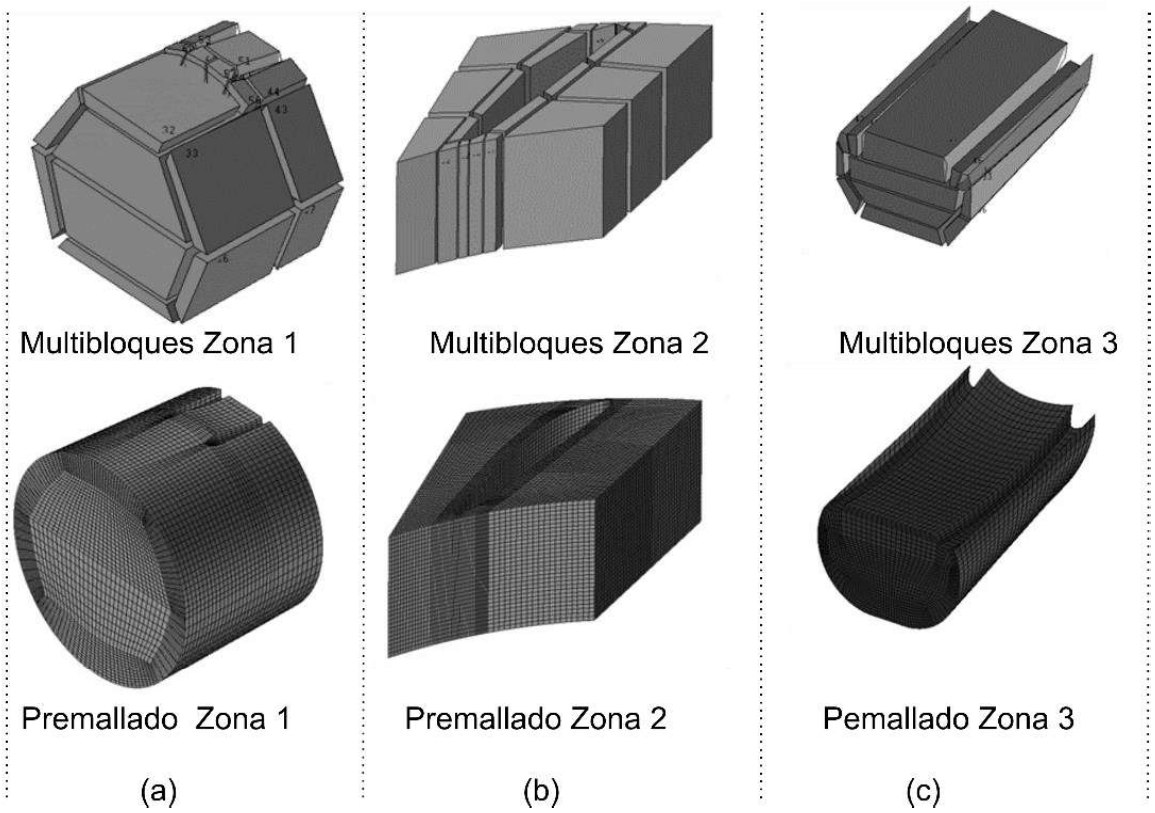
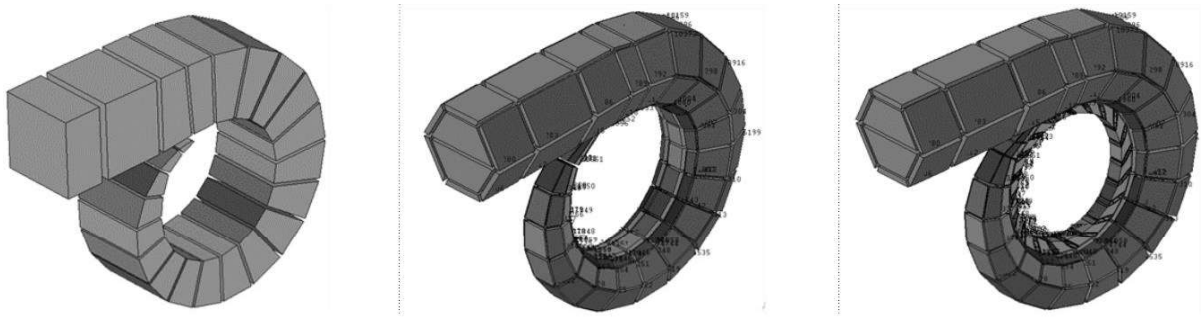



Figura AI.4.2. Topología de bloques de la caja espiral: (a) Zona 1 (b) Zona 2 (c) Zona 3
(Fuente: Propia)

Definida la topología de cada zona se realiza la creación de bloques del domino de la caja espiral considerando las conexiones anteriores como se muestra en la Figura AI.4.2 que representa la evolución de los bloques, para la Figura AI.4.3 (a) muestra el punto de inicio con un bloque en la zona 1 que a partir de este las caras en dirección del flujo se extraen uno a uno hasta la punta de la caja espiral utilizando una topología de abajo hacia arriba para tener control sobre cada bloque.

La Figura AI.4.3 (b) utiliza una topología O-grid en todos los bloques anteriores y basándose en el bloqueo de la zona 2 y 3 la conexión a la zona 1 se colapsa los vértices de la arista externa como resultado se incrementa el número de bloques para la zona 2, los vértices se mueven de tal manera para reducir pequeños ángulos de los bloques y minimizar los elementos concentrados en las esquinas. Los bloques para los álabes fijos se obtienen con la extrusión de las caras de la zona 2 hacia el interior de la caja espiral de forma simultánea como se representa en la Figura AI.4.3 (c) la topología del bloqueo es igual para todos los álabes.



(a) (b) (c)

Figura AI.4.3. Evolución de bloques de la caja espiral
(Fuente: Propia)

La visualización de pre-mallado se obtiene configurando los bordes de cada bloque de forma paralela o independiente para cada bloque se definen los números de nodos en base al análisis y la calidad de mallado para las zonas obtenidas en la Figura AI.4.3. De esta forma a través de un proceso iterativo se modifican los números de nodos de los bloques de la caja espiral hasta obtener una calidad aceptable evitando la creación de volúmenes negativos, los elementos decrecen de forma continua a lo largo de la dirección del fluido y el dominio se completa en su totalidad con elementos hexaédricos, la forma de la malla se observa en la Figura AI.4.4 y los valores se muestran en la Tabla AI.4.1. Considerando los criterios de calidad los valores son aceptables al tener un porcentaje mayoritario de elementos con un ángulo mayor a 15°, valor recomendado por el solucionador CFX y la calidad con criterio Quality mayor a 0.3 valor recomendado [17].

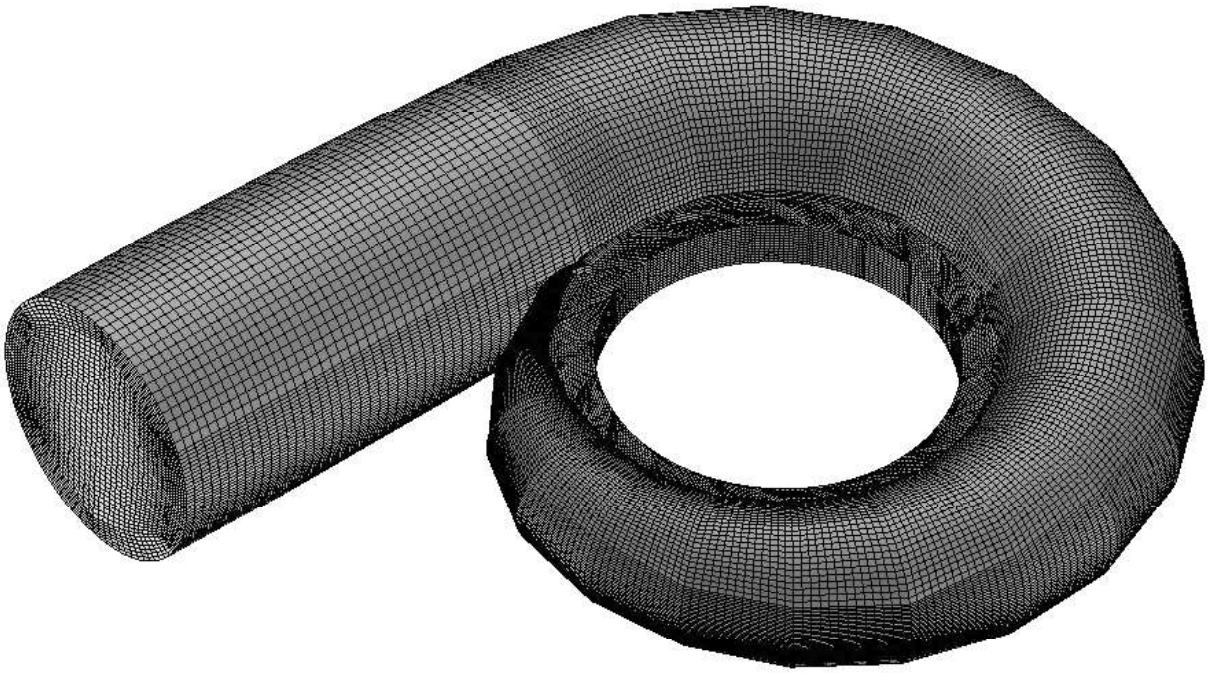


Figura AI.4.4. Pre-mallado de la caja espiral
(Fuente: Propia)

Tabla AI.4.1. Criterios de calidad del dominio de la caja espiral

| **Bloques** | **Elementos** | **Nodos** | **Criterios de calidad** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 488 | 691628 | 655941 | Ángulo | | Quality | |
| | | | **[ ° ]** | **[%]** | **[ ]** | **[%]** |
| | | | 0-9 | 0 | 0-0.1 | 0 |
| | | | 9-18 | 0.03 | 0.1-0.2 | 0.083 |
| | | | 18-27 | 0.61 | 0.2-0.3 | 0.065 |
| | | | 27-36 | 5.37 | 0.3-0.4 | 0.22 |
| | | | 36-45 | 3.16 | 0.4-0.5 | 1.86 |
| | | | 45-54 | 3.68 | 0.5-0.6 | 4.43 |
| | | | 54-63 | 9.34 | 0.6-0.7 | 2.77 |
| | | | 63-72 | 15.77 | 0.7-0.8 | 5.046 |
| | | | 72-81 | 27.93 | 0.8-0.9 | 22.32 |
| | | | 81-90 | 34.06 | 0.9-1 | 63.18 |

(Fuente: Propia)

## Anexo II. Metodología de mallado de los álabes directrices.

La zona de mallado inicial se estudia en un álabe donde la geometría del volumen de control requiere simplificaciones en los bordes externos como se muestra en la Figura AII.4.1, se adhieren líneas guías para definir la geometría total del dominio y se considera el canal hidráulico entre dos álabes consecutivos. Para este tipo de geometría las superficies en los bordes se unen para adaptar los elementos a la dirección del canal.

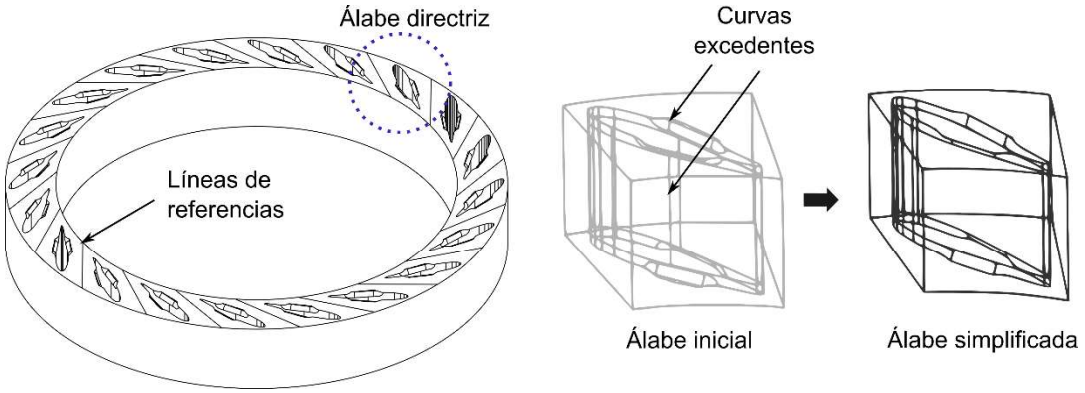



Figura AII.4.1. Simplificación de los álabes directrices
(Fuente: Propia)

La evolución del bloques para esta zona de mallado se presenta en la Figura AII.4.2 (a), la topología utilizada es de arriba hacia abajo, es decir se corta el bloque inicial de tal forma que cree bloques alrededor del álabe adaptándose a la geometría, se proyectan los vértices externos a los círculos interior y exterior como se indica en la Figura AII.4.2 (b) y (c), se realiza iteraciones para el número de nodos en los bordes de cada bloque y se obtiene una mallado mínimo de 0.4 bajo el criterio Quality y la forma resultante se muestra en la Figura AII.4.2 (d).

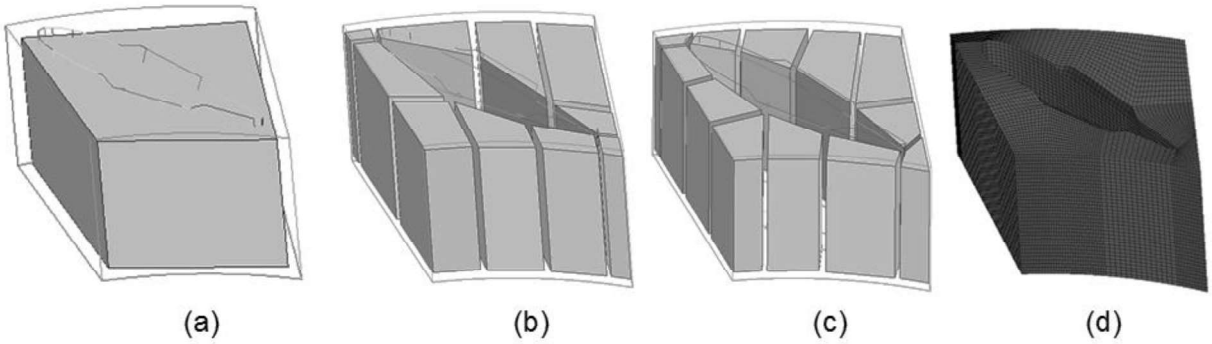



Figura AII.4.2. Evolución de bloques y Pre-mallado de un álabe directriz
(Fuente: Propia)

Para el dominio total de los álabes directrices se realiza bloques de forma semejante a la zona de mallado presentada en la Figura AII.4.2, el objetivo principal de la topología del canal hidráulico es buscar la ortogonalidad de los hexaedros con respecto a los perfiles de los álabes al ingreso y la salida.

El dominio generado con multibloques se muestra en la Figura AII.4.3 cada bloque consecutivo tiene la topología anterior estudiada para un solo álabe y se obtiene la malla del domino con una calidad mínima de 0.3 bajo el criterio de Quality, los valores mínimos en este rango de calidad se indican en la Tabla AII.4.1 que representa la cantidad de elementos bajo criterios de calidad de mallado con un porcentaje mínimo del aceptable para los distintos solucionadores, para este estudio cumple con los requisitos recomendados en ANSYS CFX.

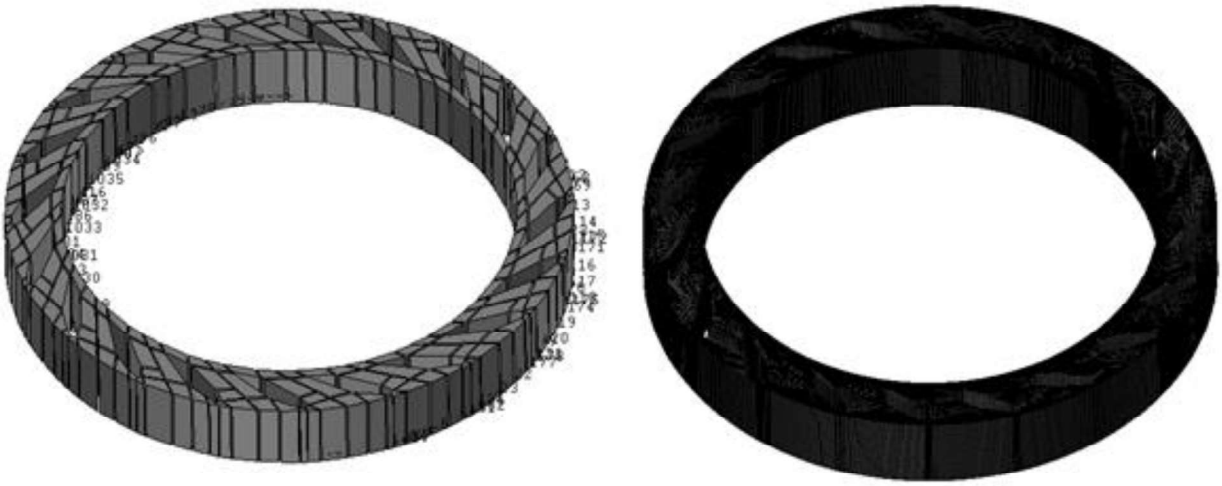


Figura AII.4.3. Pre-mallado de los álabes directrices
(Fuente: Propia)

Tabla AII.4.1. Criterios de calidad del dominio de los álabes directrices

| **Bloques** | **Elementos** | **Nodos** | **Criterios de calidad** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 220 | 1210544 | 1112400 | Ángulo | | Quality | |
| | | | **[ ° ]** | **[%]** | **[ ]** | **[%]** |
| | | | 0-9 | 0 | 0-0.1 | 0 |
| | | | 9-18 | 0.003 | 0.1-0.2 | 0 |
| | | | 18-27 | 2.80 | 0.2-0.3 | 0 |
| | | | 27-36 | 14.61 | 0.3-0.4 | 0 |
| | | | 36-45 | 31.14 | 0.4-0.5 | 1.058 |
| | | | 45-54 | 23.93 | 0.5-0.6 | 4.35 |
| | | | 54-63 | 14.86 | 0.6-0.7 | 14.32 |
| | | | 63-72 | 9.15 | 0.7-0.8 | 27.07 |
| | | | 72-81 | 2.88 | 0.8-0.9 | 19.31 |
| | | | 81-90 | 0.60 | 0.9-1 | 9.01 |

(Fuente: Propia)

## Anexo III. Metodología de mallado del rodete.

El dominio del rodete presenta múltiples líneas y superficies abiertas que pueden ser requeridas durante la estrategia de multibloques para el desarrollo de la malla, por tal motivo se realiza una simplificación de su geometría muy rigurosa para prevenir errores durante la adaptación de los nodos a la superficie de las paletas y los bordes de salida obtengan una malla aceptable como se muestra en la Figura AIII.4.1, una vista superior del rodete indica la cantidad simplificada de la geometría con una mayor concentración en el transcurso del canal hidráulico entre paletas.

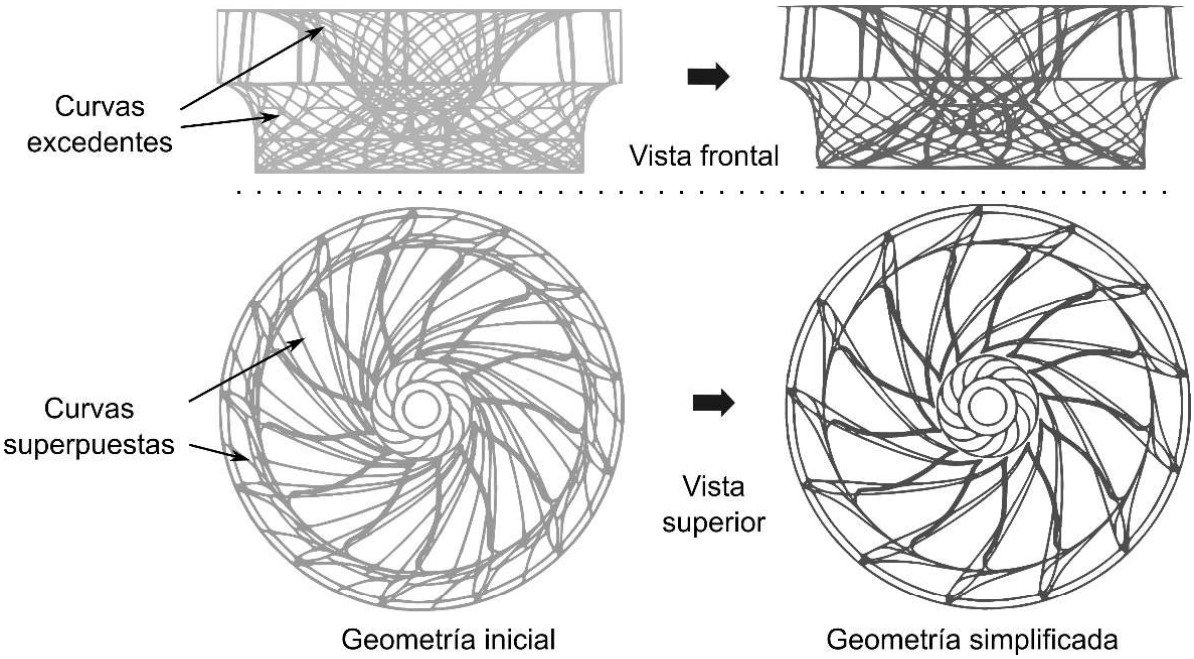



Figura AIII.4.1. Simplificación de la geometría del rodete
(Fuente: Propia)

Para el proceso de discretización del rodete se evalúa utilizar bloques en la zona del canal hidráulico para generar toda la malla a partir de una matriz circular pero los resultados bajo criterios de calidad no son aceptables entre un rango de 0 a 0.1 y en otras iteraciones presentaban generaciones de volúmenes negativos con valores de calidad menores a 0. Por tal motivo se utiliza una segunda opción que consiste en utilizar una topología de abajo hacia arriba esto lleva una cantidad de tiempo adicional para enlazar los bloques necesarios desde la zona central del rodete hacia el contorno interviniendo en los trece canales hidráulicos que tiene el rodete.

En la Figura AIII.4.2 se muestra la evolución de bloques, el punto de inicio se encuentra en la base como se indica en la Figura AIII.4.2 (a) una extrusión de bloques se aplica formando

un anillo con 13 bloques continuos, el propósito es unir todos los bloques en un punto central y colapsen entre ellos para realizar este proceso los vértices se unen uno a uno hasta formar un punto común de intersección. El pre mallado se aplica para verificar una calidad aceptable pero los bloques agudos presentan un ángulo que no cumple con los requisitos de calidad, para solucionar esta etapa de mallado se requiere una estructuración de Y-block que se utiliza para unir un dominio de cuña periódico, una forma es la creación de ¼ de O-grid y a través del movimiento de vértices definir la forma de los bloques.

El siguiente conjunto de bloques lo constituye la extrusión de las caras externas hacia el inicio de las paletas del rodete y con dirección a su contorno inicial en la base representada en la Figura AIII.4.2 (b) los bordes inferiores de cada bloque se asocian a la curva inicial del rodete y se dividen en paralelo en el inicio de las paletas para configurar el número de nodos y los elementos no tengan una deformación muy aguda.

El canal hidráulico entre las paletas se forma en este conjunto de bloques representado en la Figura AIII.4.2 (c) las caras superiores de los bloques anteriores se dividen para separar el vacío generado de la paleta en el volumen de control y a su vez se aplica la operación de extrusión de caras para cada bloque con un paso de división a una altura media de la paleta debido a la geometría no uniforme hasta llegar al final de su superficie superior, en esta zona el canal hidráulico se va formando por lo que en este proceso cada bloque requiere la asociación de los bordes hacia las curvas de las paletas previniendo un enlace incorrecto entre cada superficie adyacente.

La Figura AIII.4.2 (d) representa todos los canales hidráulicos del rodete formado por 26 bloques a su alrededor este número representa el doble de paletas por la división generada en la zona anterior, una operación de pre mallado permite observar la generación de volúmenes negativos por causas del volumen de control que aún no se completa con los bloques necesarios y existen zonas vacías en el borde superior del rodete.

La Figura AIII.4.2 (e) representa el cierre de los bloques externos utilizando la operación de crear bloques entre las caras de los bloques adyacentes y el volumen de control cierra su contorno para adaptar los elementos a las superficies del rodete donde los bordes de los bloques se asocian a las curvas superiores en una sola operación, esta etapa finaliza la discretización apropiada para los bloques del rodete.

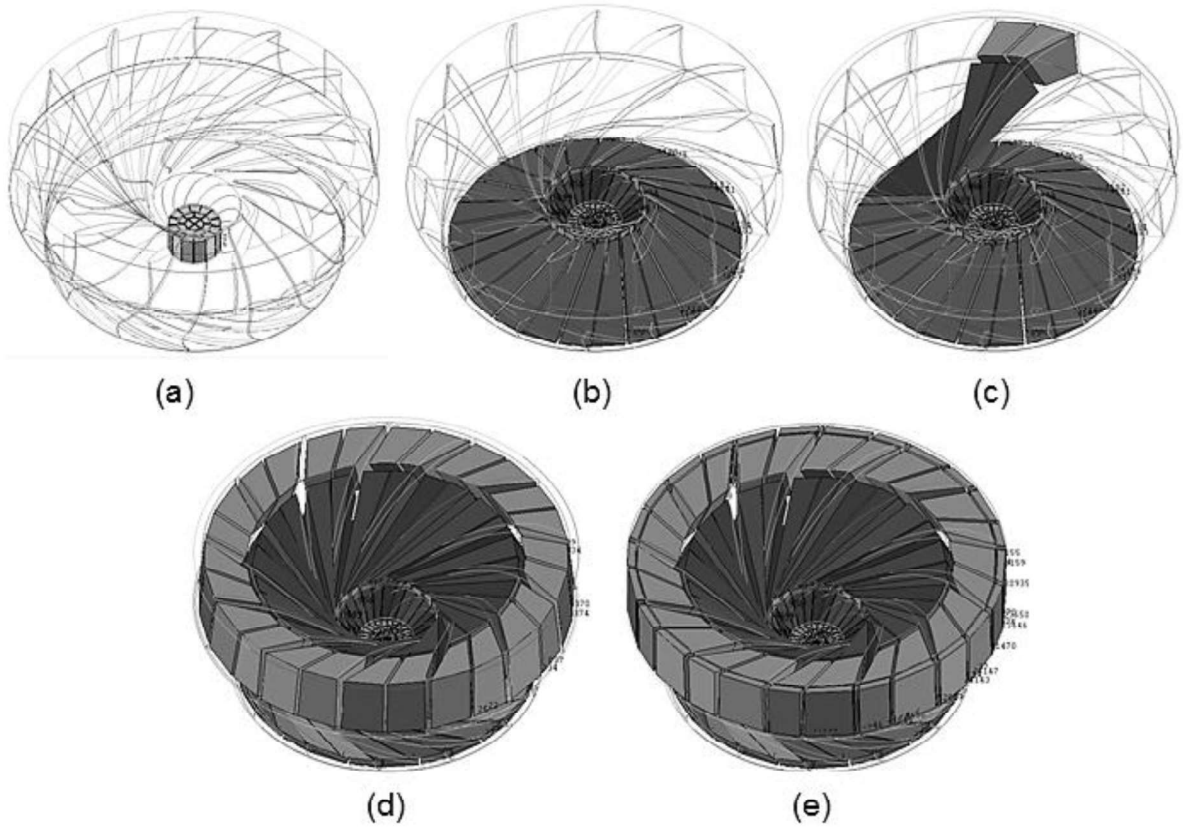


Figura AIII.4.2. Evolución de las topologías de bloques en el rodete
(Fuente: Propia)

La operación de pre mallado permite observar como los elementos hexaédricos se adaptan a la geometría del volumen de control después de asociar los bloques a las zonas geométricas del rodete, en este proceso las superficies de cada paleta se asocian entre ellas generando volúmenes negativos y los indicadores de calidad bajo cero. La solución aplicada es realizar iteraciones entre los vértices de los bloques con sus posiciones a lo largo de las curvas de las paletas, un paso complementario es realizar nuevamente una asociación entre las superficies de las paletas con las caras de cada bloque adyacente llegando a ser esta zona donde se concentra el mayor número de errores de calidad y se obtiene la Figura AIII.4.3 (a) después de realizar iteraciones entre el número de elementos de cada bloque para obtener una calidad de malla aceptable descrita en la Tabla AIII.4.1 donde bajo el criterio de Quality no existen valores menores a 0.1 y el ángulo solicitado para los solucionadores presentan pocos elementos menores a 10° con la mayoría de elementos que satisfacen esta condición.

La Figura AIII.4.3 (b) representa la forma de los elementos alrededor de la superficie de las paletas, zona donde existía conflictos para asociar los bloques hacia las superficies.

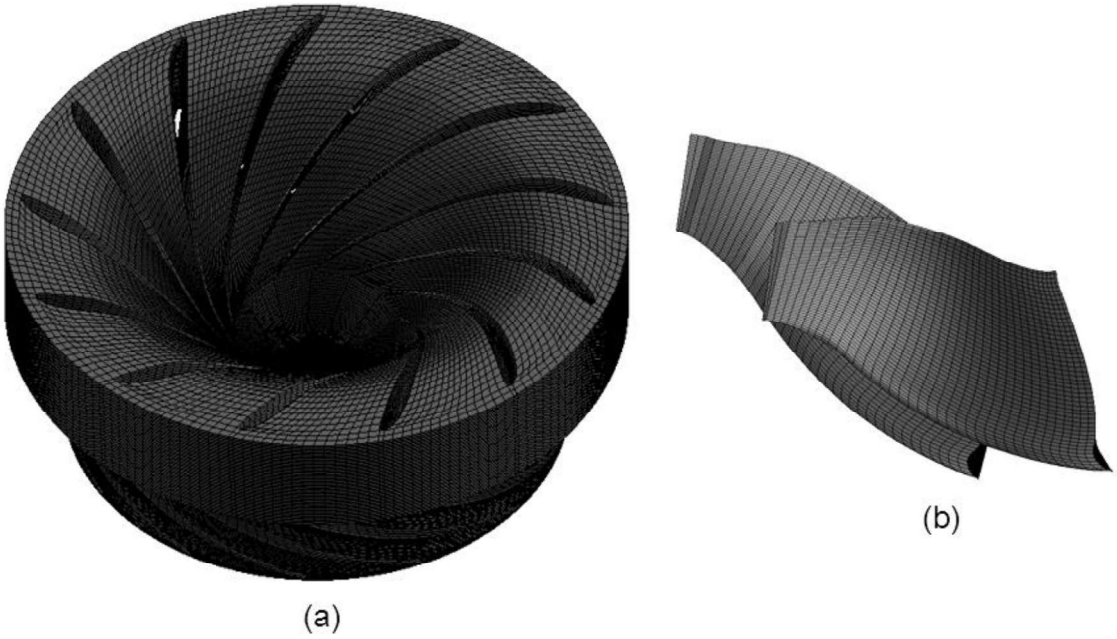



Figura AIII.4.3. Visualización del pre-mallado del rodete
(Fuente: Propia)

Tabla AIII.4.1. Criterios de calidad del dominio del rodete

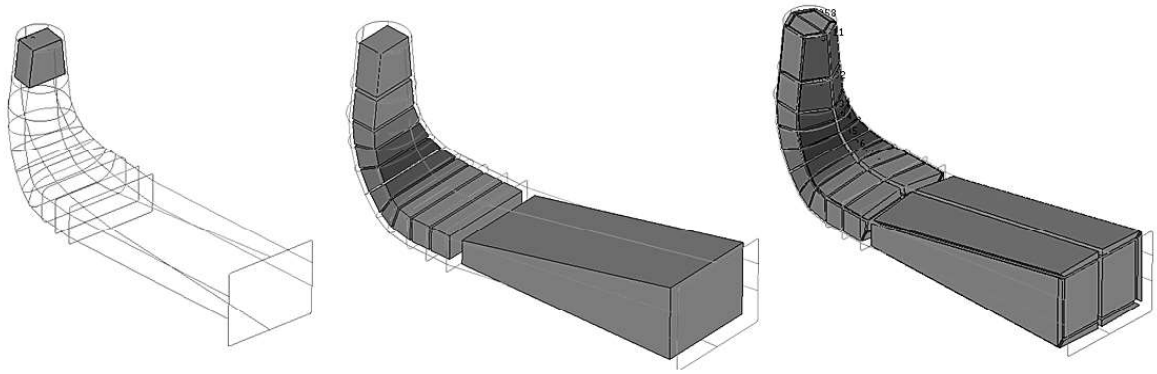
| **Bloques** | **Elementos** | **Nodos** | **Criterios de calidad** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 208 | 902045 | 845025 | Ángulo | | Quality | |
| | | | **[ ° ]** | **[%]** | **[ ]** | **[%]** |
| | | | 0-9 | 0.02 | 0-0.1 | 0 |
| | | | 9-18 | 3.199 | 0.1-0.2 | 0.08 |
| | | | 18-27 | 9.52 | 0.2-0.3 | 2.59 |
| | | | 27-36 | 10.80 | 0.3-0.4 | 6.54 |
| | | | 36-45 | 13.32 | 0.4-0.5 | 7.20 |
| | | | 45-54 | 17.74 | 0.5-0.6 | 8.51 |
| | | | 54-63 | 14.39 | 0.6-0.7 | 11.08 |
| | | | 63-72 | 15.24 | 0.7-0.8 | 17.05 |
| | | | 72-81 | 10.73 | 0.8-0.9 | 20.917 |
| | | | 81-90 | 5.09 | 0.9-1 | 26.028 |

(Fuente: Propia)

# Anexo IV. Metodología de mallado del tubo de descarga.

La simplificación para el tubo de descarga se realiza con la eliminación de curvas adicionales en las superficies a lo largo de cada zona y se requiere completar ciertas curvas que están incompletas resultado de la importación no son reconocidas y estas se deben crean formando anillos circulares y rectangulares al final del dominio representada en la Figura AIV.4.1 (a).

La evolución de bloques inicia con la estrategia de abajo hacia arriba es decir un bloque inicial en la zona circular del tubo de descarga es generado entre dos curvas adyacentes, a continuación una operación de extrusión de caras en cada bloque forma un conjunto de bloques continuos a lo largo del tubo de descargar representado en la Figura AIV.4.1 (b) y cada borde de bloque es asociado a las curvas más cercanas de la geometría. Una división para todos los bloques es representada en la Figura AIV.4.1 (c) a continuación se proyecta los vértices hacia los bordes de cada curva y al final se aplica un O-grid para todos los bloques.



(a) (b) (c)

Figura AIV.4.1. Evolución de bloques del tubo de descarga
(Fuente: Propia)

El número de elementos en la operación de pre mallado es definido a través de la configuración del número asignado para cada borde de los bloques, con múltiples iteraciones se obtiene una forma creciente del tamaño de cada elemento hexaédrico desde el ingreso con una zona circular hasta la salida de forma rectangular donde se crean elementos de mayor tamaño de forma lineal creciente representada en la Figura AIV.4.2.

La calidad de malla tiene valores mínimos de 0.5 bajo el criterio de Quality y un ángulo mínimo de 36°. La Tabla AIV.4.1 muestra los números de elementos bajo estos indicadores de calidad que cumplen con los requisitos mínimos para los solucionadores y es evidente que una geometría no muy compleja genere estos valores no muy dispersos y el mallado es estructurado de la mejor manera para este dominio.

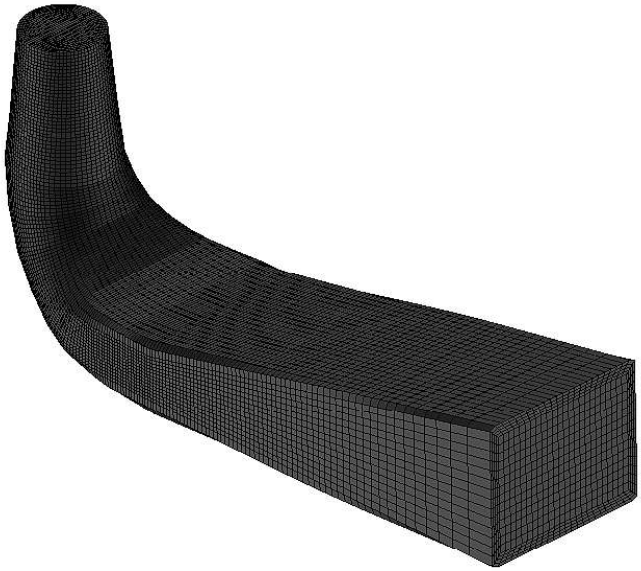


Figura AIV.4.2. Visualización del pre-mallado del tubo descarga
(Fuente: Propia)

Tabla AIV.4.1. Criterios de calidad del dominio del tubo de descarga

| **Bloques** | **Elementos** | **Nodos** | **Criterios de calidad** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 88 | 121816 | 114072 | Ángulo | | Quality | |
| | | | **[ ° ]** | **[%]** | **[ ]** | **[%]** |
| | | | 0-9 | 0 | 0-0.1 | 0 |
| | | | 9-18 | 0 | 0.1-0.2 | 0 |
| | | | 18-27 | 0 | 0.2-0.3 | 0 |
| | | | 27-36 | 0 | 0.3-0.4 | 0 |
| | | | 36-45 | 0.54 | 0.4-0.5 | 0 |
| | | | 45-54 | 4.43 | 0.5-0.6 | 0.104 |
| | | | 54-63 | 12.35 | 0.6-0.7 | 1.66 |
| | | | 63-72 | 15.83 | 0.7-0.8 | 8.94 |
| | | | 72-81 | 41.90 | 0.8-0.9 | 35.69 |
| | | | 81-90 | 24.94 | 0.9-1 | 53.60 |

(Fuente: Propia)

## Anexo V. Datos generales de la turbina de la Central San Francisco.

| | |
|---|---|
| Presión estática a la entrada | $2{,}1 \times 10^6$ Pa |
| Potencia Máxima | 117,1 MW |
| Potencia Nominal | 115 MW |
| Caída por la potencia máx | 216,58 m |
| Caudal por la potencia máx | 58,0 $m^3/s$ |
| Velocidad de rotación | 327,27 rpm |
| Velocidad de embalamiento | 548 rpm |
| Diámetro del rodete | 2450 mm |
| Diámetro entrada del caracol | 3000 mm |
| Número de álabes del rodete | 13 |
| Número de álabes directores | 20 |
| Eficiencia máxima | 95,5 % |
| Sentido de giro | Horario (visto desde la parte superior) |
| Densidad del agua | 999,85 $Kg/m^3$ |
| Gravedad | 9,777 $m/s^2$ |
| Temperatura del agua | 16 ℃ |
| Fabricante/Suministro | VATECH |

## Anexo VI. Resultado del estudio de (Christian Mora, 2018) para comparación.

| Dominio computacional | Número de elementos | Número de nodos | Omega Ω |
|---|---|---|---|
| Caja espiral | 3653946 | 674628 | 5,416 |
| Álabes directrices | 66488586 | 12809120 | 5,190 |
| Rodete | 8984538 | 1669883 | 5,380 |
| Tubo de descarga | 960146 | 184475 | 5,204 |
| **Total** | **80087216** | **2727438** | **5,221** |

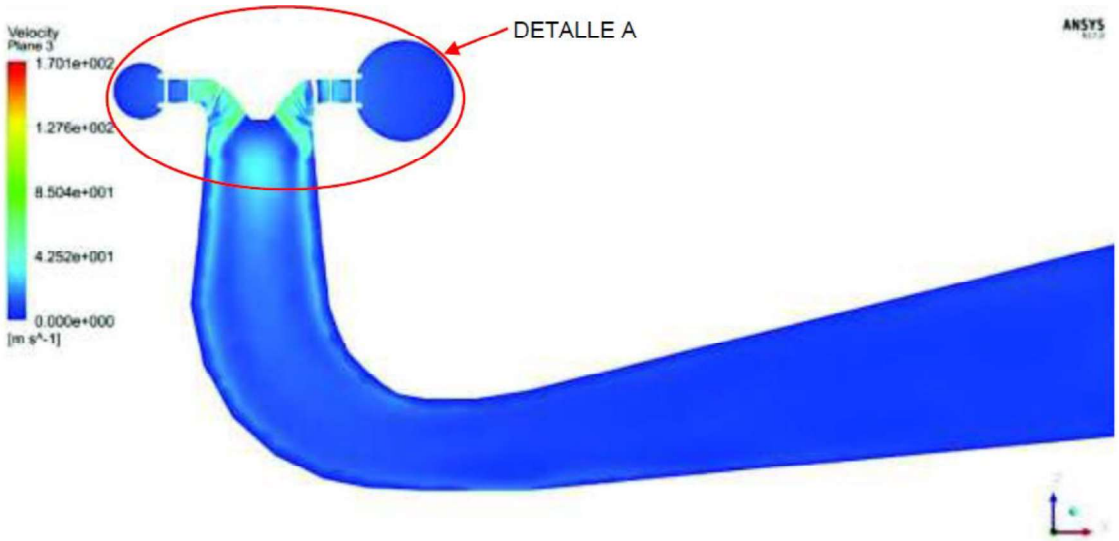
## Anexo VII. Resultado del estudio de (Christian Mora, 2018) para comparación.

| Mallas no estructuradas generadas automáticamente | |
|---|---|
| (a) Caja espiral | (b) Álabes directrices |
| (c) Rodete | (d) Tubo de aspiración |

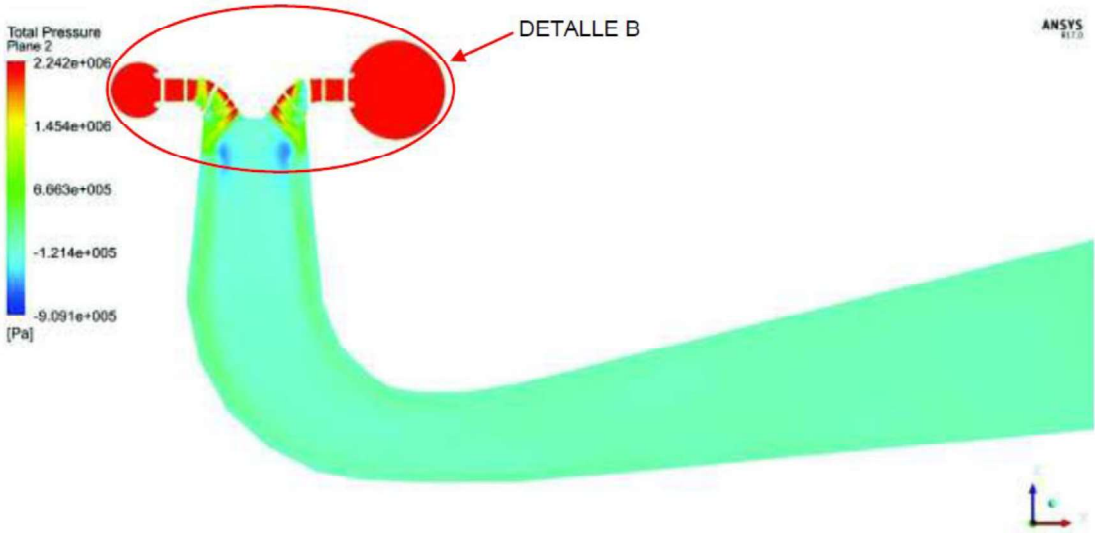
## Anexo VIII. Configuración numérica de (Huamaní & Braga, 2018) para comparación.

| Parámetro | Descripción |
|---|---|
| Modelo de turbulencia | SST |
| Tipo de malla | Hibrida, nodos 4915936 |
| Tipo de simulación | Estacionario |
| Interfaces | Periodicidad del rotor y distribuidor móvil: para multiplicar el sector del rotor: periodicidad rotacional, conexión de malla: GGI |
| | espiral-distribuidor, distribuidor-rotor y rotor-tubo de succión: Conexión general, modelo de mezcla: stage, pitch change: automático, conexión de malla: GGI |
| Condiciones de contorno | entrada: caudal - 5% intensidad de turbulencia |
| | salida: presión relativa de salida -5 % intensidad de turbulencia |
| Fluido | agua a 25 ℃ , transferencia de calor: isotérmica |
| Solver control | esquema de adveccion: high resolution |
| | turbulencia numérica: primer orden |
| Convergencia de control | Min-máx. Iteraciones: 1-400 |
| Criterio de convergencia | residual target (RMS): 1E-5 |
| Run type | run mode: serial, intel core i5 5200 CPU @2.20GHz 8 RAM |
| Tiempo estimado por una simulación | 30 h 16 min 44,79 s |

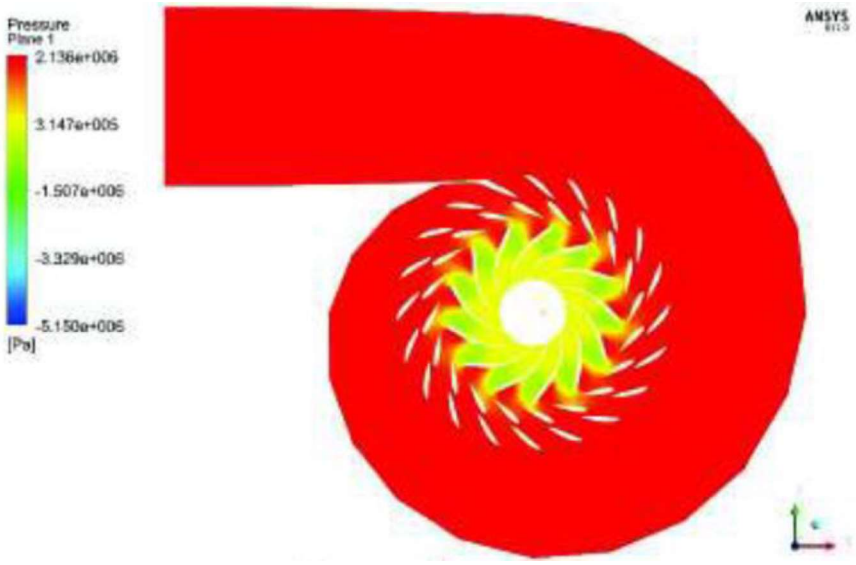
## Anexo IX. Resultado del estudio de (Christian Mora, 2018) para comparación.



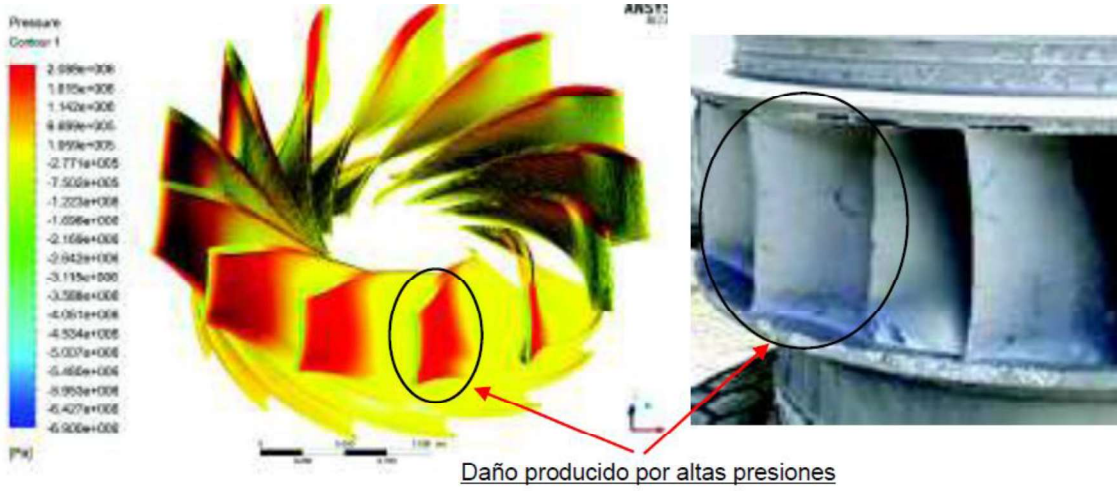

(a) Resultado de la simulación en CFX del perfil de velocidad




(b) Resultado de simulación en CFX de perfil de presión




(c) Perfil de presión en vista superior




(d) Perfil de presión en las paletas del rodete

# Anexo X. Expresiones en ANSYS CFX en estado estable e inestable.

- Expresión para el coeficiente de presión (Cp) en ANSYS CFX en estado estable:

  (*Pressure*-**ave**(*Pressure*)@**Streamline2**)/(0.5**Density**(**ave**(*velocity*)@**S3**)^2)

- Expresión de Velocidad adimensional en ANSYS CFX en estado estable:

  *Velocity*/**ave**(*Velocity*)@**INLET**

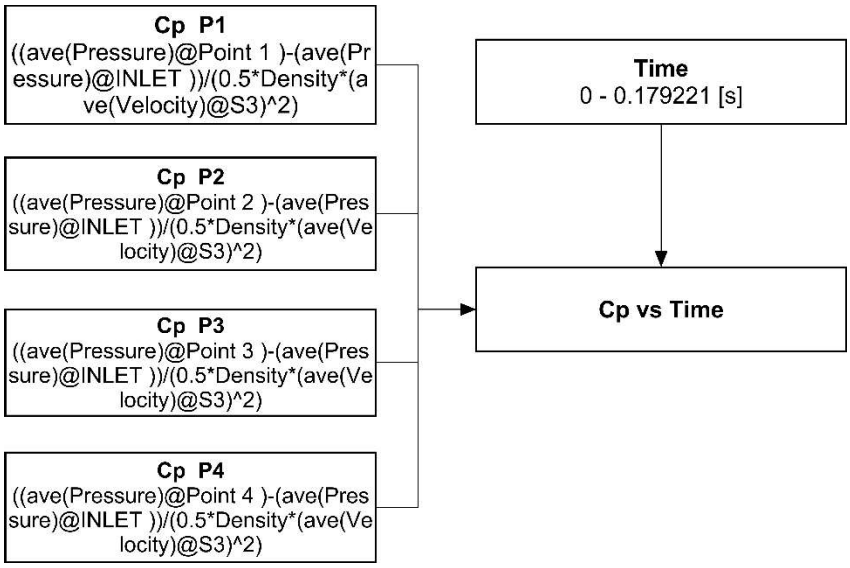



Figura X.4.1. Esquema del flujo de expresiones para obtener el coeficiente de presión de cuatro puntos en estado inestable
(Fuente: Propia)

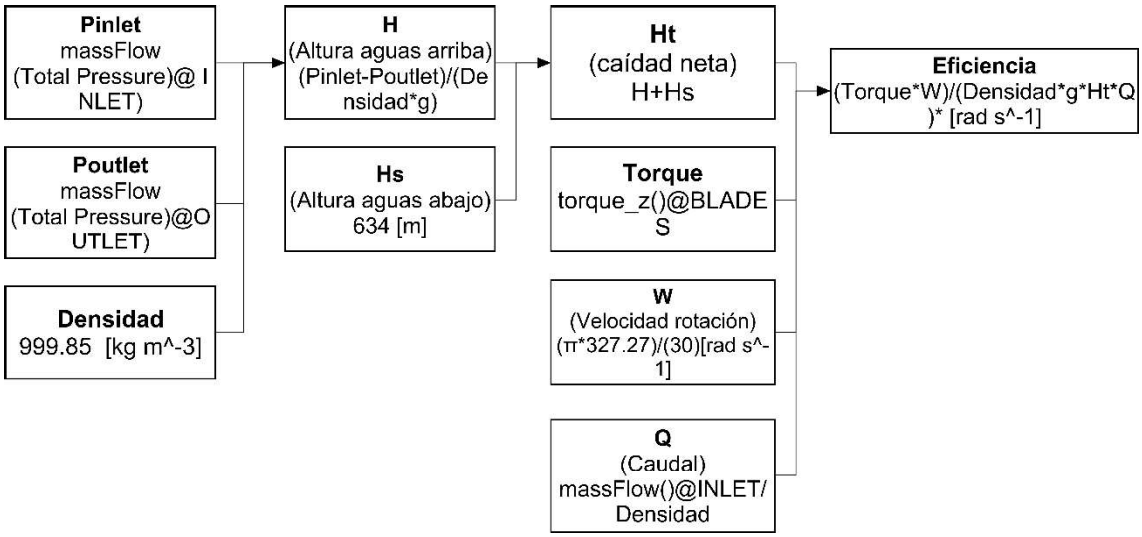



Figura X.4.2. Expresiones para la obtención de la eficiencia de la turbina
(Fuente: Propia)

## Anexo XI. Resultado del estudio de (Christian Mora, 2018) para comparación.

| Eficiencia experimental | Eficiencia numérica | Error (%) |
|---|---|---|
| 89,14 | 80,266 | 9,95 |
| 89,14 | 80,169 | 10,06 |