

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA MICRO TURBINA TIPO KAPLAN, BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN

Cristian Camilo Cardona Mancilla

Carlos Andrés Sánchez Ríos

Ingeniería Mecatrónica

Diego Andrés Hincapié Zuluaga

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

29 DE MAYO DE 2015

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El desarrollo sostenible se basa en tres pilares inseparables fundamentales que son el desarrollo social, económico y la protección del medio ambiente con el fin de garantizar la dignidad humana para todos, la falta de energía eléctrica en pequeñas comunidades aisladas es a menudo un obstáculo para el desarrollo socio-económico, para el 2008 este tipo de comunidades en Colombia llegaron a representar 5.38 % de los hogares. Al tener sistemas de generación de energía eléctrica/mecánica amigables con el medio ambiente con potencias no superiores a 100 kW, como es el caso de los sistemas modulares de microgeneración hidráulica, este obstáculo puede ser superado y relegado.

En este trabajo, se evaluará de forma general el potencial hidráulico en Colombia para la aplicación de centrales de microgeneración hidráulica y se establecerán condiciones promedio referentes a caudal y caída. Con los datos anteriores, se diseñará una microturbina tipo Kaplan, para ser evaluada y caracterizada vía simulación numérica en diferentes condiciones hidrodinámicas.

El resultado más significativo de este proyecto, es el diseño de una turbina Kaplan, estableciendo una metodología que dé cuenta de las ventajas y desventajas de manera cuantitativa del rendimiento y desempeño de ésta, bajo diferentes condiciones de operación hidrodinámica.

Palabras clave: Caída, caudal, energía eléctrica, microturbina Kaplan, microgeneración, simulación numérica.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Se agradece a los docentes Diego Andrés Hincapié Zuluaga, Juan José Arbeláez, Juan Gonzalo Ardila Marín y Edwar Andrés Mesa por el acompañamiento presentado durante gran parte de la carrera, apoyando y aportando tanto a nivel de conocimiento como a nivel personal y profesional, con el fin de generar para nosotros mejores oportunidades en la vida, además de formarnos de manera integral y ética durante nuestro proceso de aprendizaje. Se agradece también al semillero de investigación de Computación Avanzada y Diseño Digital (CADD) por permitirnos el espacio, los equipos y los conocimientos de sus integrantes, durante gran parte de nuestra estadía en la institución, agradeciendo además al grupo de Materiales Avanzados y Energía (MATyER) por la acogida y las ayudas generadas hacia nosotros en las diferentes actividades realizadas dentro del semillero. Al docente Jorge Sierra, por la continua disposición para resolver nuestras dudas y ayudarnos a entender de mejor manera los diferentes procesos involucrados a la hora de llevar a cabo la etapa final del proyecto y el informe final del mismo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

ANSYS Software de simulación ingenieril

CFD Dinámica de Fluidos Computacional

DG Generación Distribuida

IGES Especificación de Cambio de Gráficos Inicial

MHP Micro Hidroeléctricas

MVF Método de Volúmenes Finitos

NX Paquete de software de diseño computacional avanzado

ONU Organización de las Naciones Unidas

PNUD Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

RES Fuentes de Energía Renovables

RPM Revoluciones Por Minuto

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Generalidades.....	6
1.2. Objetivos.....	8
1.3. Organización de la tesis	9
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. Microgeneración hidráulica.....	10
2.2. Turbinas hidráulicas y CFD.....	12
3. METODOLOGÍA.....	17
3.1. Capítulo I: Generación de la geometría de una turbina Kaplan	17
3.1.1. Fase I: Generación de la geometría en Heliciel®	17
3.1.2. Fase II: Generación del fluido circundante	29
3.2. Capítulo II: Generación del mallado del fluido en Ansys16.0®	61
3.3. Capítulo III: Configuración del módulo CFX de Ansys16.0® para el análisis hidrodinámico de una turbina Kaplan	83
3.4. Capítulo IV: Estudio de malla.....	113
3.5. Capítulo V: Artículo realizado a partir del trabajo.....	141
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	154
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	159
REFERENCIAS	160

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

Esta sección está dividida en tres partes: Generalidades, donde se presentan la justificación, la pertinencia y el planteamiento del problema abordado; objetivos, donde se encuentra el objetivo general y los objetivos específicos del proyecto; y organización de la tesis, donde se describe lo que aborda cada uno de los capítulos de la tesis.

1.1. Generalidades

En septiembre del 2000, se realizó la cumbre del milenio, de ella participaron 189 países que discutieron en rol de la Organizaciones de las Naciones Unidas en el nuevo siglo (Programas de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2012), como resultado de esta cumbre se lograron algunos acuerdos que fueron consignados en la Declaración del Milenio. Esta declaración tiene en total ocho objetivos fundamentales, dos de ellos hacen referencia directa con la energía como pilar fundamental en el desarrollo humano, estos objetivos son:

“Erradicar la pobreza extrema y el hambre” y
“Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente”,

La ONU reconoce explícitamente la dependencia recíproca entre el crecimiento, la reducción de la pobreza y el desarrollo sostenible. En Colombia se estableció el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) para despertar una mayor conciencia y verificar los progresos realizados a lo que concierne a la Declaración del Milenio, para nuestro país se establecieron seis temas estratégicos que contribuyen a desarrollar PNUD, estos son:

- Gobernabilidad Democrática,
- Paz, Desarrollo y Reconciliación,
- Superación de la Pobreza,
- Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Gestión Integral del Riesgo,
- Equidad de Género y
- Informe Nacional de Desarrollo Humano.

Dentro de los temas “Superación de la Pobreza” y “Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible” se proponen algunos frentes de trabajo como lo son el desarrollo económico e incluyente, mercados inclusivos, cambio climático y biodiversidad.

Paralelamente a lo anterior, la unidad de planeación minera energética plantea: “En la permanente búsqueda de la sostenibilidad en el desarrollo, el uso de las energías renovables a gran escala es uno de los grandes desafíos del hombre del siglo XXI, en virtud a sus perspectivas ventajosas en términos ambientales frente a los sistemas tradicionales de generación, se prevé que para el 2030 las energías alternativas aportaran al menos en un 30% de la capacidad requerida por la humanidad para atender adecuadamente sus necesidades energéticas.

No obstante con su amplio inventario de recursos energéticos primarios como carbón, gas natural y petróleo, Colombia afronta el reto de satisfacer su demanda energética en términos de calidad y oportunidad con criterios de eficiencia técnica, económica y a precios asequibles a sus usuarios, especialmente en zonas geográficas aisladas, de difícil acceso y distantes de sistema interconectado. Es en este contexto que el aprovechamiento del recurso hídrico a través de pequeñas centrales hidráulicas se convierten en una atractiva opción para la solución de requerimientos energéticos en el país” (UPME, 2009).

Una de las soluciones convergente a lo mencionado anteriormente es el análisis fluido dinámico de las turbinas tipo Kaplan, ya que con este trabajo se reducirían las brechas tecnológicas en el campo de la transformación energética para regiones aisladas o apartadas geográficamente en nuestro país, proporcionando soluciones tipo “Agua – Cable” (water - wire) y “Agua- Máquina” (water-machine) de alto desempeño con un alto valor científico y tecnológico. En este trabajo se realizará la evaluación y caracterización de una micro turbina tipo Kaplan, bajo diferentes condiciones de operación, generando

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

conocimiento funcional que facilite el establecimiento de los parámetros óptimos de operación que brinden una mayor obtención de potencia.

Con la caracterización y evaluación de una microturbina tipo Kaplan se establecerá una metodología de diseño que permitirá que el tiempo de selección y concepción de los parámetros óptimos de operación se reduzca al 50 % y además que se obtenga información acerca del desempeño y eficiencia hidráulica.

1.2. Objetivos

Objetivo general

- Evaluar el comportamiento de una microturbina tipo Kaplan bajo condiciones hidrodinámicas estandarizadas, caracterizando como parámetro de diseño principal el rendimiento hidráulico de diferentes geometrías vía simulación numérica y de esta forma garantizar la apropiación de nuevo conocimiento para el desarrollo de PCH o MHP en Colombia.

Objetivos específicos

- Identificar y establecer, el potencial hidráulico disponible para generación eléctrica basada en microturbinas y las condiciones hidrodinámicas promedio para este tipo de aplicaciones en la hidrografía colombiana.
- Diseñar de manera conceptual y detallada una microturbina tipo Kaplan variando el ángulo de ataque de sus álabes de manera que se desempeñe adecuadamente en las condiciones hidrodinámicas promedio.
- Desarrollar simulaciones hidrodinámicas de forma numérica que evalúen diferentes parámetros de diseño y de desempeño para la microturbina tipo Kaplan, en diferentes condiciones o puntos de diseño determinados vía diseño de experimentos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.3. Organización de la tesis

En el capítulo I *“Generación de la geometría de una turbina Kaplan”*, se presenta la generación de una turbina Kaplan a partir de la utilización del software Heliciel®, el cual es un software francés que a partir del ingreso de determinados parámetros que le permiten generar el entorno en el cual se desenvolverá dicha turbina, arroja la geometría de ésta con la cantidad de álabes requeridos para afrontar dichas condiciones, permitiendo una posterior exportación al software NX9.0®, en el cual se lleva a cabo el proceso de modelación tridimensional de la misma a partir de las curvas de uno de los álabes.

El capítulo II *“Generación del mallado del fluido en Ansys16.0®”*, presenta paso a paso el proceso de discretización y la denominación de las fronteras del modelo en el módulo de mallado de Ansys16.0®, lo cual es requerido posteriormente para la realización del proceso de análisis de un modelo virtual en los módulos de Ansys®.

En el capítulo III *“Configuración del módulo CFX de Ansys16.0® para el análisis hidrodinámico de una turbina Kaplan”*, se desarrolla paso a paso la configuración del entorno en el cual se desenvolverá dicha turbina, estableciendo las condiciones a las cuales estará sometida cada frontera definida en el capítulo II, además del respectivo método de simulación empleado para el análisis.

El capítulo IV *“Estudio de malla”*, presenta paso a paso la designación de los parámetros requeridos tanto de entrada como de salida del modelo, que son requeridos para realizar el estudio de malla empleando el método de puntos de diseño, y la configuración de dichos parámetros desde la tabla de puntos de diseño (*“Table of Design Points”*) para obtener los resultados que permitirán el posterior análisis del comportamiento de la malla.

Y por último, el capítulo V *“Artículo realizado a partir del trabajo”*, muestra un artículo elaborado a partir del proceso de diseño de una turbina Kaplan y la configuración del módulo de análisis CFX de Ansys® siguiendo los pasos consignados en esta tesis de grado.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

En este proyecto convergen dos áreas del conocimiento que son: micro generación hidráulica y las turbinas hidráulicas, por este motivo se trabaja en apartados independientes cada uno de sus marcos teóricos.

2.1. Microgeneración hidráulica

En la última década, los problemas relacionados con los factores energéticos (crisis petrolera), ecológicos (cambio climático), la demanda eléctrica (un crecimiento significativo) y restricciones de los mercados mayoristas han surgido en todo el mundo. Estas dificultades, lejos de encontrar soluciones eficaces, están aumentando continuamente, lo que sugiere la necesidad de alternativas tecnológicas para asegurar su solución. Una de estas alternativas tecnológicas se llama generación distribuida (DG – *Distributed Generation*), y consiste en la generación de energía eléctrica lo más cerca posible del lugar de consumo, de hecho, como se hizo en los inicios de la industria eléctrica, pero ahora se incorporan las ventajas de la tecnología moderna. Aquí se consolida la idea de utilizar fuentes de energía renovables (RES – *Renewable Energy Sources*) que no causan contaminación ambiental, como eólica, fotovoltaica, hidráulica, entre otras (Márquez, Molina, & Pacas, 2010). Hoy en día, la utilización de RES coincide con la creciente demanda de energía eléctrica y está determinada por las preocupaciones ambientales, el agotamiento de los combustibles fósiles y también por los aspectos económicos y sociales (Ion & Marinescu, 2011). En los últimos años, se ha dado un creciente interés en la integración de la red de micro hidroeléctricas (MHP – *Micro Hydro Power*) porque son una tecnología probada con una actuación muy buena y viable, con bajos costos de inversión, lo que resulta en la tecnología basada en RES con menores costos, incluso cuando se las compara con la generación eólica. Se espera que esta tendencia se incremente aún más

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

debido a los incentivos favorables en muchos países y retribuciones a la reducción de emisiones de carbono (Márquez, Molina, & Pacas, 2010).

Una clasificación común de las MHP es:

- (i) Micro-hidroeléctricas (hasta 100 kW).
- (ii) Mini-hidráulica (101 kW a 1 MW).
- (iii) Pequeñas centrales hidroeléctricas (1-25 MW).

Sin embargo, el término MHP se utiliza para describir todos los proyectos hidroeléctricos de hasta 25 MW de capacidad. De las aldeas sin electricidad en un país para muchas no es posible la electrificación a través de la extensión de la red convencional en un futuro próximo, ya que la mayoría se encuentran en zonas remotas, bosque, desierto montañoso, islas y las regiones tribales. Se propone abastecer con electricidad a todos estos pueblos mediante el aprovechamiento de RES disponibles localmente a través de tecnologías como los sistemas de energía solar fotovoltaica (PVS – *Photo Voltaic System*), gasificadores de biomasa y los proyectos de MHP (Nouni, Mulick, & Kandpal, 2004).

La aplicación de MHP ha atraído la atención mundial durante las últimas décadas del siglo 20. A pesar de que las MHP no son comparables a las grandes centrales hidroeléctricas en su capacidad de producción de energía, su diseño y procesos de fabricación sencillos, bajo coste por kW, fácil instalación sin necesidad de actividades de construcción pesada y fácil mantenimiento y sus impactos mínimos, las han hecho atractivas para los países ricos en potencial hídrico. Un requisito previo para los grandes potenciales hidroeléctricos es la construcción de represas a gran escala, así como todos los demás edificios e instalaciones con el fin de la generación, regulación y transmisión de energía, lo que requiere fuertes inversiones de mediano y largo plazo, así como largos procesos de construcción, además puede tener efectos adversos en los ecosistemas antes y después del punto donde se levanta la presa, puede inundar tierras agrícolas valiosas y privar a las actividades agrícolas de las aguas que necesitan; esto hace desfavorable la aplicación de grandes hidroeléctricas, una alternativa viable es la aplicación de las MHP (Yassi & Hashemloo, 2010).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Las MHP tienen algunas ventajas sobre otras RES. Los ríos son una fuente más concentrada de energía que, por ejemplo, los vientos para la energía eólica o el sol para la energía solar. La energía suministrada por una instalación MHP está continuamente disponible y la cantidad es previsible si las fluctuaciones estacionales del flujo de agua se conocen. Las emisiones de CO₂, SO₂ y NO_x son muy bajas durante la vida útil del sistema, además, la tecnología requiere poco mantenimiento y es de larga duración (aproximadamente 50 años). Las MHP son unas de las más baratas con costos de 20.7¢US/kWh, comparables con 12.8¢ para un gasificador de biomasa pequeño, 15-35¢ para una pequeña turbina eólica y 40-60¢ para un sistema solar en casa (Drinkwaard, Kirkels, & Romijn, 2010).

Algunos autores se han dedicado a proponer sistemas de apoyo a las decisiones para la creación de MHP en la región amazónica en una perspectiva de desarrollo sostenible. Proponen metodologías para analizar los proyectos de MHP para las pequeñas comunidades aisladas de la Amazonia brasileña (Blanco, Secretan, Amarante, & Mesquita, 2008). La capacidad instalada de toda la India fue 107,533.7 MW en 2003 de la cual las contribuciones de la energía hidroeléctrica, térmica, nuclear y eólica fueron 26,660.23, 76,525.11, 2,720 y 1,628.36 MW, respectivamente. Aunque el potencial hídrico total en el país se estima en 150,000 MW, sólo un 17,8% ha sido explotado hasta ahora, que aporta aproximadamente el 24,8% de la potencia total instalada. Cerca de 5,48% de la capacidad total de generación de energía hidroeléctrica es una contribución de 453 MHP instaladas en el país (Nouni, Mulick, & Kandpal, 2004).

2.2. Turbinas hidráulicas y CFD

Cuando un álabe móvil interactúa con un fluido en movimiento y en consecuencia cambia su cantidad de movimiento, entre el álabe y el chorro se generan fuerzas que realizan un trabajo por medio del desplazamiento del álabe. Las turbomáquinas se basan en este principio; las turbinas hidráulicas extraen energía del fluido en forma continua, convirtiéndola en un momento de torsión aplicado a un eje que gira. El diseño eficiente de

turbomáquinas se basa en la teoría y el experimento. Un buen diseño en cuanto a tamaño y velocidad puede ser adaptado a otras velocidades y tamaños geométricos similares, aplicando la teoría del escalamiento de modelos.(Streeter, 1994).

No se sabe exactamente cuando aparecen las turbinas hidráulicas, algunos datos sueltos son contenidos en diferentes textos (Rouse & Ince, 1957), “parece que fue en el siglo II a.c. cuando aparecieron, tal vez en el Asia menor, las primeras ruedas hidráulicas que usaron los seres humanos, para fines prácticos, quizá, para moler el trigo y elaborar el pan” (Poveda, 2007).

Pero fue hasta 1754 en que Euler publica su estudio sobre máquinas hidráulicas donde demuestra la ecuación fundamental de las turbomáquinas igualando la variación del flujo que pasa por la máquina al par rotacional producido. Es decir fue en el siglo XVIII en el que se dio la gestación de las turbinas hidráulicas y en el siglo siguiente, nacieron las turbinas Pelton y Francis. Para el siglo XX se desarrollaron dichas turbinas dando origen a otras de mayores velocidades en el rodete como la Kaplan en 1915 y la Banki en 1918. En la actualidad prácticamente las turbinas hidráulicas que se construyen son las que figuran en la *Figura 1*. En esta tabla se clasifican de acuerdo a sus características de funcionamiento y geometría.

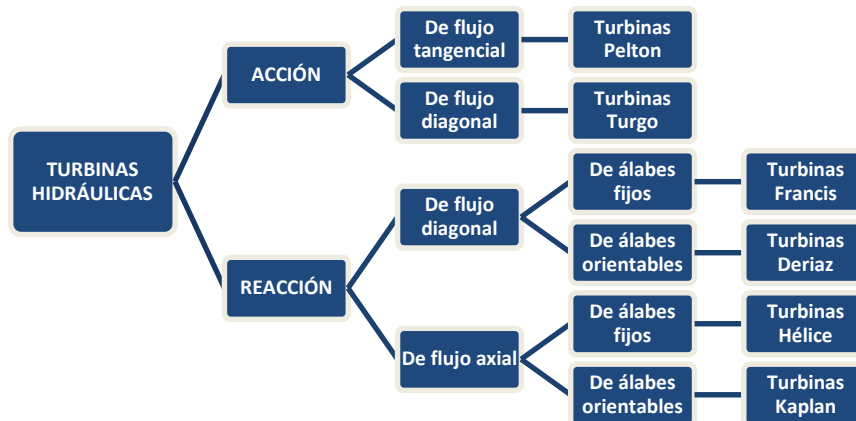


Figura 1. Clasificación de las turbinas hidráulicas (Mataix, 1975)

En las figuras de la 2 a la 5, se muestran diferentes ábacos para la selección de turbinas basados en el caudal y la cabeza, en la figuras 2 y 3 son para turbinas de gran tamaño y las figuras 4 y 5 consisten en pequeñas turbinas.

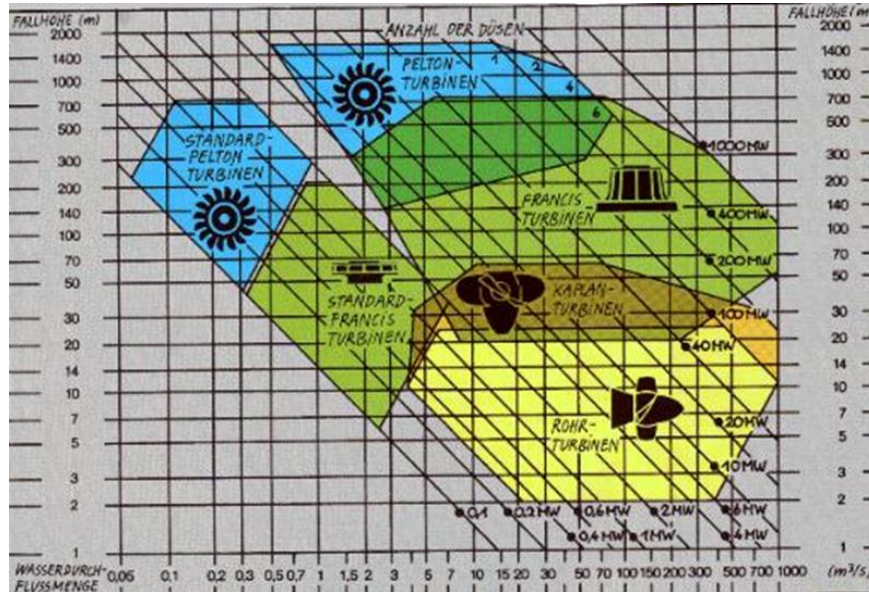


Figura 2. Ábaco para la selección de turbinas de gran tamaño estándar (BASISWISSEN, 2010).

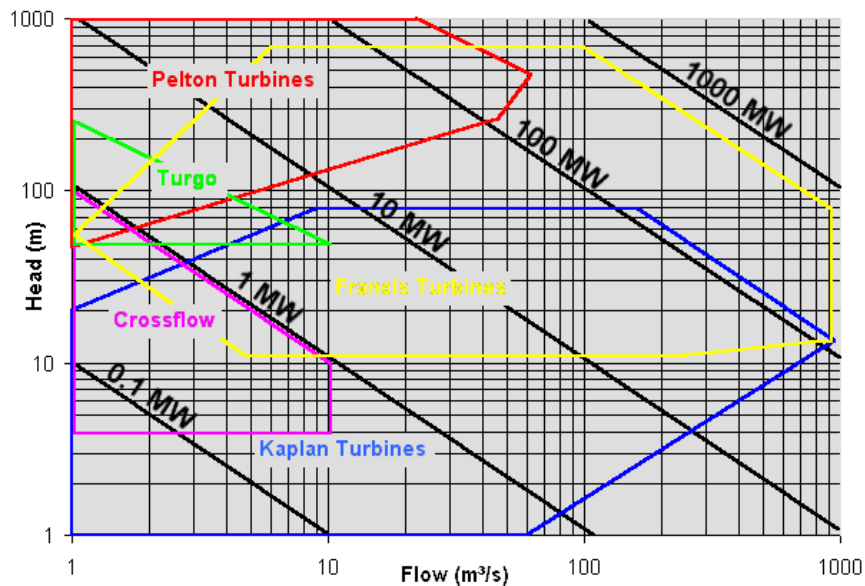


Figura 3. Ábaco para la selección de turbinas de gran tamaño ampliado (Hydroni, 2011)

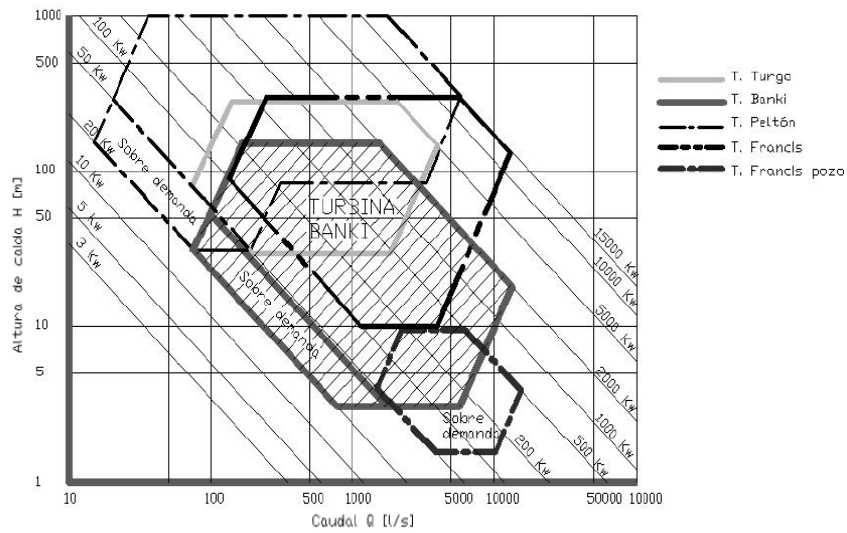


Figura 4. Ábaco para la selección de turbinas de tamaño reducido. (Gomez Gomez, Palacio, & Paredes, 2008)

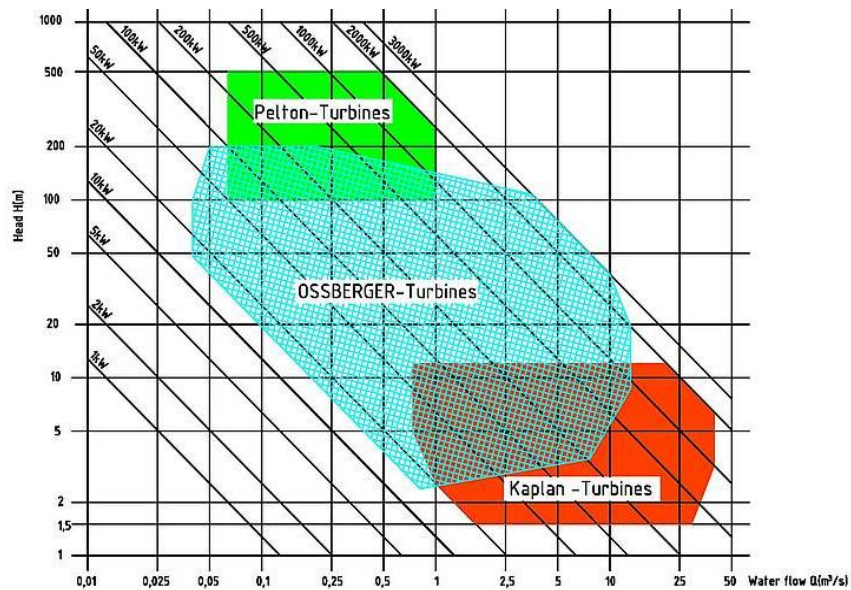


Figura 5. Ábaco de detalle para pequeñas turbinas. (OSSBERGER GmbH + Co, 2007)

Con el avance de los sistemas computacionales en lo referente a capacidad y velocidad, en la actualidad se encuentra disponible software para simulación en área de la mecánica de fluidos, que puede ser empleada como una valiosa herramienta de apoyo en el proceso de diseño, optimización y análisis de turbomaquinaria, este puede llegar a simular el comportamiento del fluido y su interacción con los diferentes componentes. Esto puede

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

reducir significativamente el tiempo de desarrollo de la nueva turbomáquina y su optimación.(Wu, Shimmei, & Tani, 2007).

Las micro turbinas tipo Kaplan son turbomáquinas de reacción axial, las cuales, junto a las turbinas Banki, generan mayor velocidad de giro en el rodete y son usualmente utilizadas para columnas de agua entre los 5 y 70 m, lo que permite su uso en ríos o riachuelos locales con pocas diferencias de altura. Normalmente la cantidad de álabes que componen su hélice varía entre 3 y 7 (Mataix, 1984), su principal característica es la posibilidad que ofrecen de poder rotar sus álabes, con el fin de orientarlos mejor frente al chorro, aumentando la eficiencia en la transferencia de energía del fluido al rodete. Cuando un alabe móvil interactúa con un fluido en movimiento, y en consecuencia cambia su cantidad de movimiento, entre el alabe y el chorro se generan fuerzas que realizan un trabajo por medio del desplazamiento del alabe. Las turbinas hidráulicas extraen energía del fluido en forma continua, convirtiéndola en un momento de torsión aplicado a un eje que gira.

En la década de los 70's, grandes avances en los métodos numéricos aplicados a la ingeniería se realizaron especialmente los relacionados con las técnicas de diferencias finitas y elementos finitos, en el campo de la hidrodinámica se desarrolló la técnica de Dinámica de Fluidos Computacional conocida ampliamente como ampliamente como CFD (Roache, 1972) y diferentes modelos matemáticos de turbulencia (Launder & Spalding, 1972), también fueron desarrollados. Solo para 1978 fue cuando estos avances fueron introducidos en el diseño y se inicia la simulación numérica de flujo en turbomaquinaria hidráulica.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo presenta cinco capítulos, los cuales son: Generación de la geometría de una turbina Kaplan, generación del mallado del fluido en Ansys®, configuración del módulo CFX de Ansys® 16.0 para el análisis hidrodinámico de una turbina Kaplan, estudio de malla y artículo realizado a partir del trabajo.

3.1. Capítulo I: Generación de la geometría de una turbina Kaplan

El desarrollo de la geometría fue llevado a cabo empleando en primera instancia una aplicación computacional especializada en el diseño de turbinas llamado Heliciel®, y en segunda instancia un programa especializado en el modelado paramétrico llamado Siemens® NX 9.

3.1.1. Fase I: Generación de la geometría en Heliciel®

En la *Figura 6* se observa la ventana de bienvenida de la aplicación Heliciel®, ésta brinda por defecto uno de los múltiples proyectos que contiene para que el usuario pueda interactuar con el software.

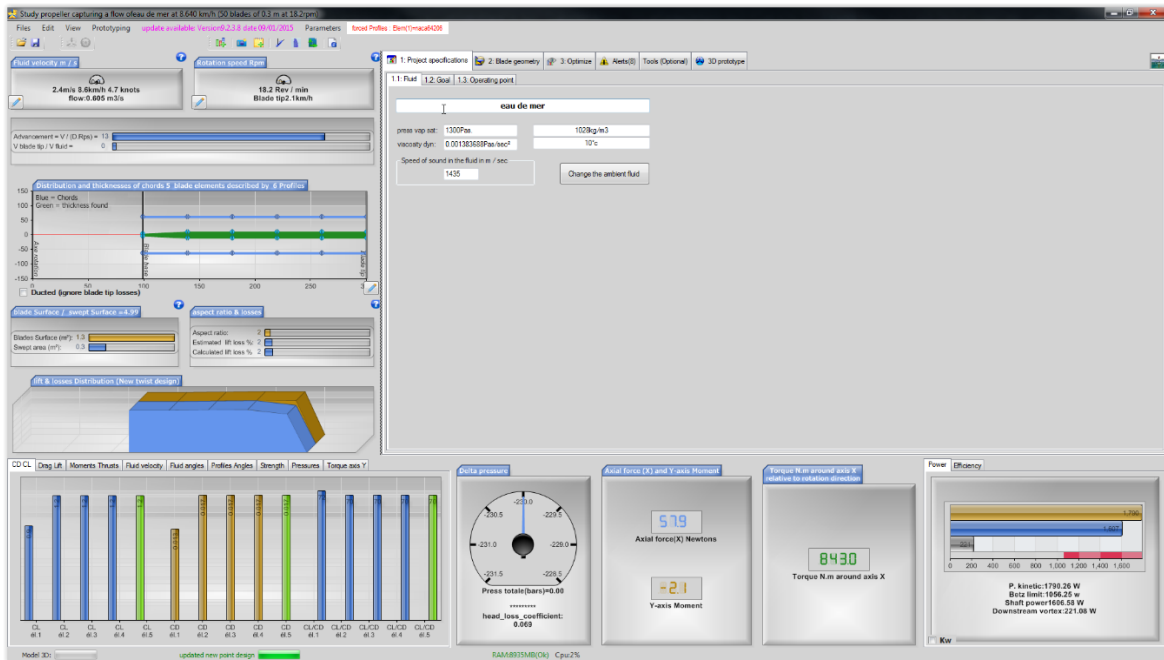


Figura 6. Pantalla principal de Heliciel

Para este trabajo se utilizó como base la plantilla correspondiente a una turbina hidroeléctrica, esto se logra dirigiéndose a la barra de menú Files/New project (from a model)/hydroelectric turbine propeller, tidal (Figura 7).

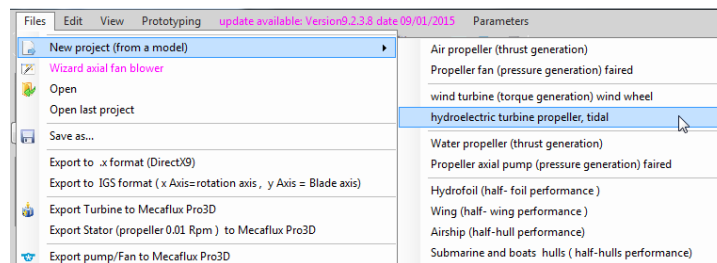


Figura 7. Selección del tipo de turbina requerida en el software Heliciel®.

A continuación, es necesario modificar el tipo de fluido con el cuál operará la turbina, ya que por defecto el programa está configurado para trabajar con agua de mar, para esto, se debe dar clic en el botón Change ambient fluid (Figura 8), ubicado en la pestaña “1: Project specifications” que se encuentra en la zona central de la ventana principal de la aplicación, y a su vez en la pestaña “1.1: Fluid”. Posteriormente se procede a seleccionar eau H2O (Figura 9), se selecciona en la tabla de características del fluido seleccionado una

temperatura de 20° Celsius, debido a que es la que más se aproxima a la temperatura ambiente y finalmente se da clic en “Utiliser ce fluide” para que el programa realice los cambios realizados.

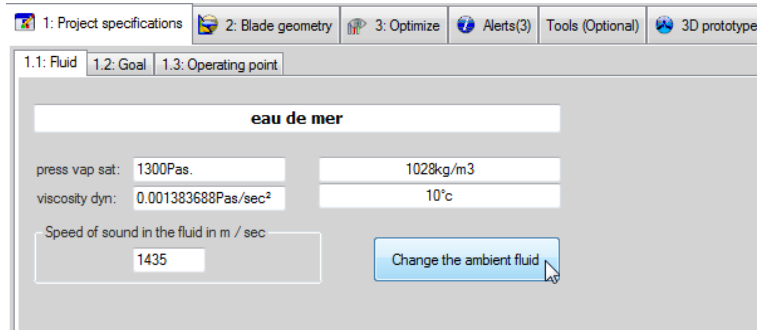


Figura 8. Modificación del tipo de fluido requerido en el software Heliciel®.

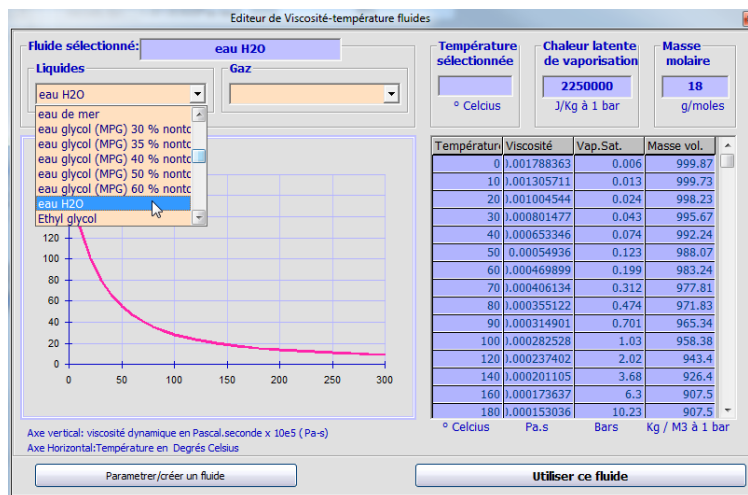


Figura 9. Pantalla de la base de datos de fluidos contenidos en el software Heliciel®.

Continuando con la generación de la turbina, se procede al diseño de la geometría de la turbina, utilizando parámetros definidos según las condiciones de operación del entorno en el cual se requiere llevar a cabo el análisis, para lo cual se selecciona la sección “2: Blade Geometry” (Figura 10).

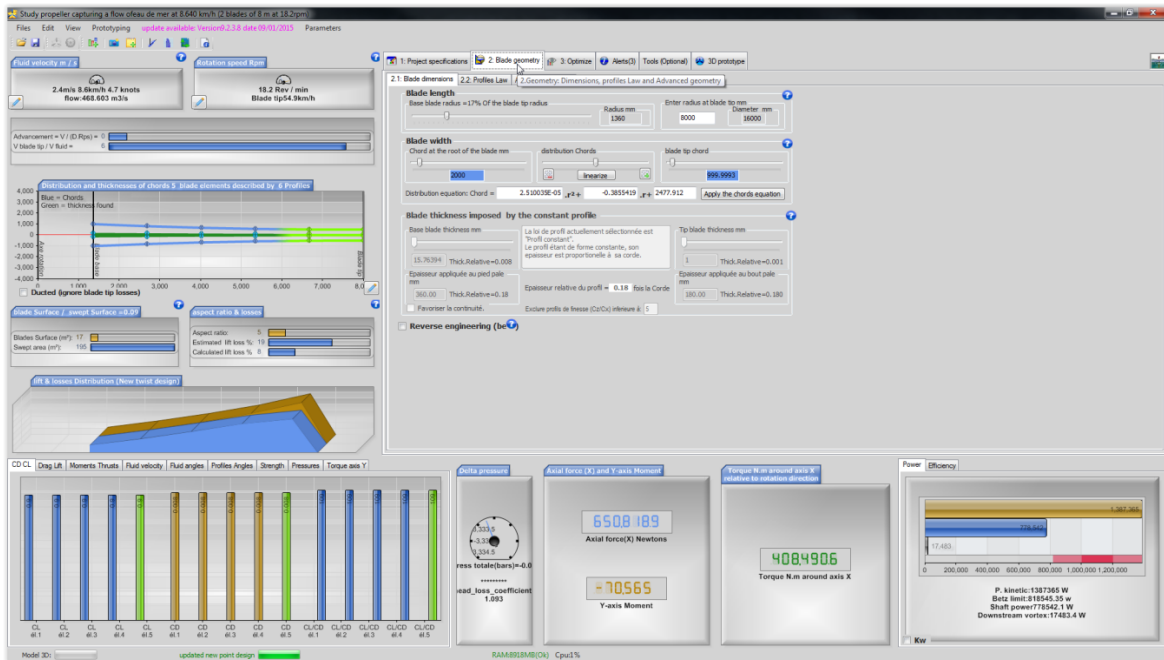


Figura 10. Ventana de configuración de los parámetros de diseño requeridos en el software Heliciel®

En la pestaña “2.1: Blade dimensions”, se comienza definiendo el radio de la punta del álabe (“radius at blade tip”), éste definirá el radio total de la turbina, estableciéndose en este caso un valor de 250 mm y se establece una configuración para la longitud del área de álabe (“Blade length”) del 20%, equivalente a un radio de 50 mm. Luego, en la sección “Blade width” se encuentran las variables relacionadas con la longitud y los radios interno y externo del álabe, éstos son ligeramente menores al radio total de la turbina, con el objetivo de mantener una relación geométrica correcta de los álabes al igual que sus dimensiones y curvatura, teniendo la posibilidad de manipular o controlar la distribución de dichas dimensiones de forma manual, mediante la definición de los valores correspondientes, o por medio de la ecuación de cuerdas, la cual es una ecuación cuadrática que determina la relación entre el extremo y la raíz del álabe.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

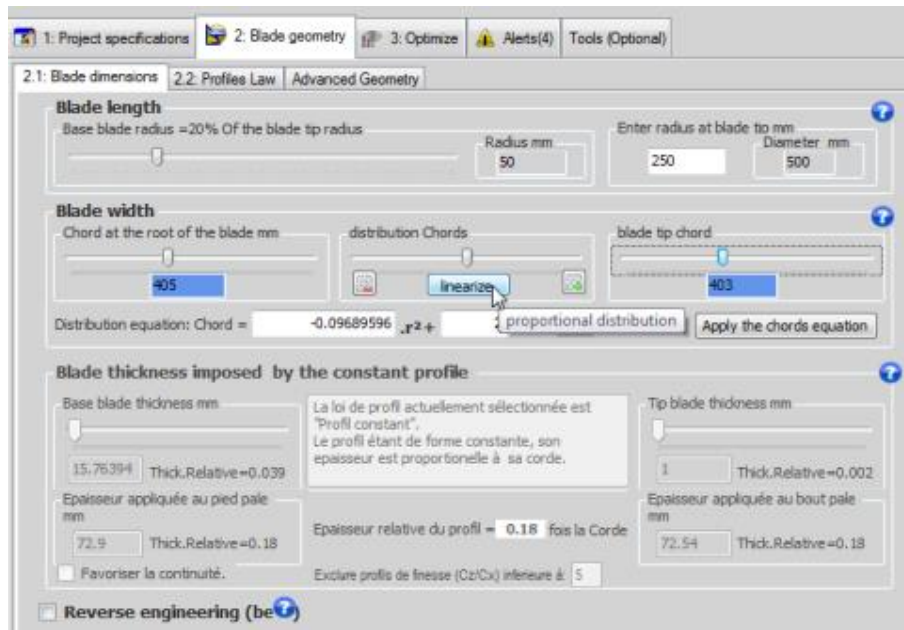


Figura 11. Proceso de configuración de los parámetros de diseño requeridos en el software Heliciel®

Uno de los parámetros de mayor relevancia en el diseño del álabe es la aplicación de la opción linealizar (“linearize”), que ejerce una incidencia directa en la forma de los álaves, eliminando deformidades y curvaturas en el perfil (Figura 12); esta herramienta pese a ser bastante útil en la generación del perfil adecuado para el álabe, presenta una gran sensibilidad por lo cual debe tenerse cuidado en su aplicación, es recomendado modificar a baja escala las relaciones entre las cuerdas del álabe y si se desea aplicar la linearización para verificar los cambios. La longitud del álabe para este caso estará dada por el perfil NACA que será seleccionado a continuación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

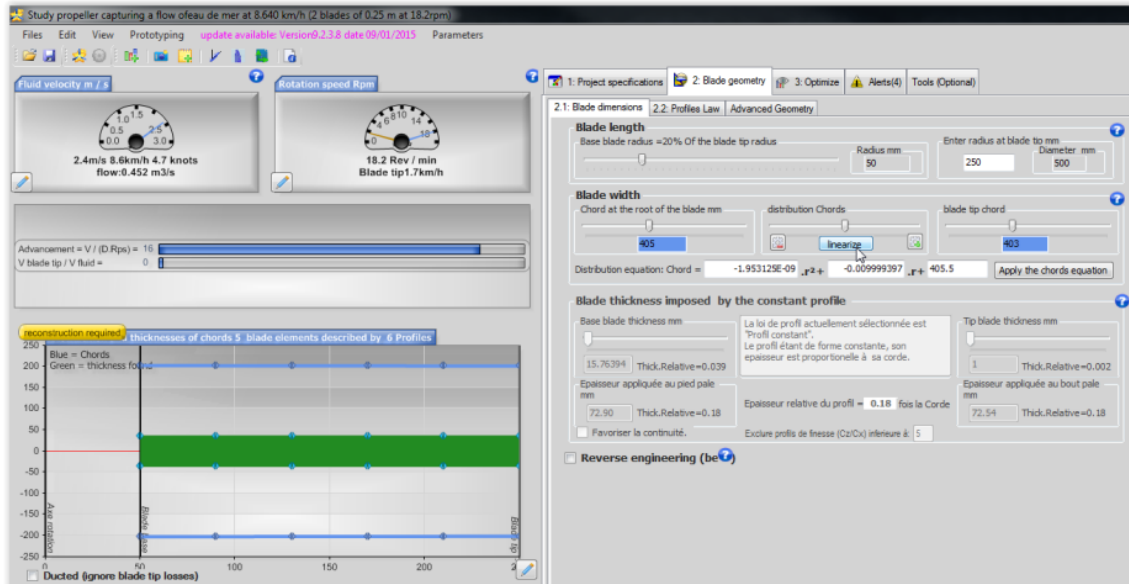


Figura 12. Proceso de configuración de los parámetros de diseño requeridos en el software Heliciel®

El paso siguiente en la definición de las dimensiones de la turbina, es la selección del perfil del ábale a utilizar, lo cual se realiza seleccionando las pestañas “2: Blade geometry” y “2.2:Profiles Law”, y dando clic en “Select the default profile”

Figura 13).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

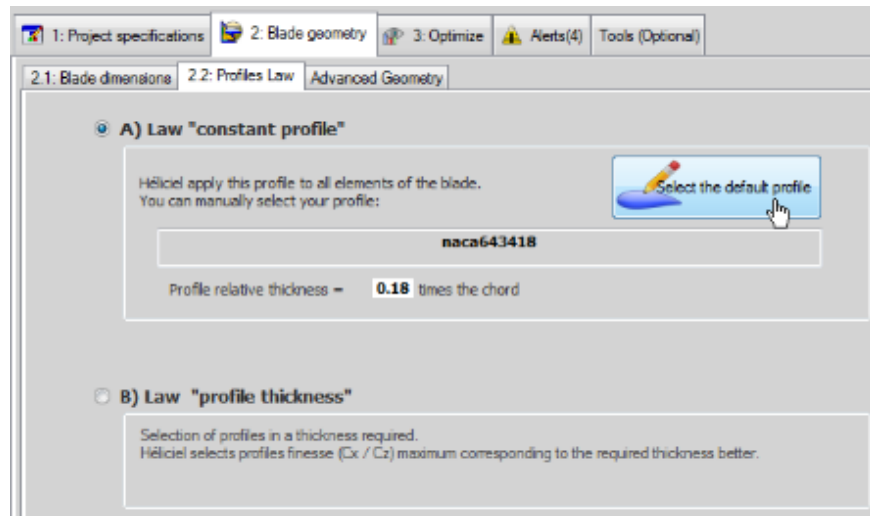


Figura 13. Selección del perfil NACA que se utilizará como base para el desarrollo de la turbina Kaplan en el software Heliciel®.

En la *Figura 14* se observa la ventana de la base de datos con múltiples perfiles de álabes que contiene el programa Heliciel®, cada uno de éstos discretizado por nombre, espesor, número de Reynolds y diferentes componentes de fuerzas. En este trabajo se empleó el perfil naca64206 para un número de Reynolds de 1000000; en la parte superior derecha de la ventana “*inter active data base profiles*” se observa un gráfico del perfil seleccionado con algunas medidas de información, el porcentaje de cuerda que se muestra en dicha ventana será el porcentaje de longitud del álabe que debe tenerse en cuenta en la definición de las dimensiones de la geometría. Una vez se ha seleccionado el perfil deseado se da clic en la opción “*Default profile (profile law)*” para aceptar los cambios y aplicar el perfil seleccionado a la geometría. Una vez aplicados los cambios el programa genera automáticamente un modelo tridimensional de la geometría creada (*Figura 15*).

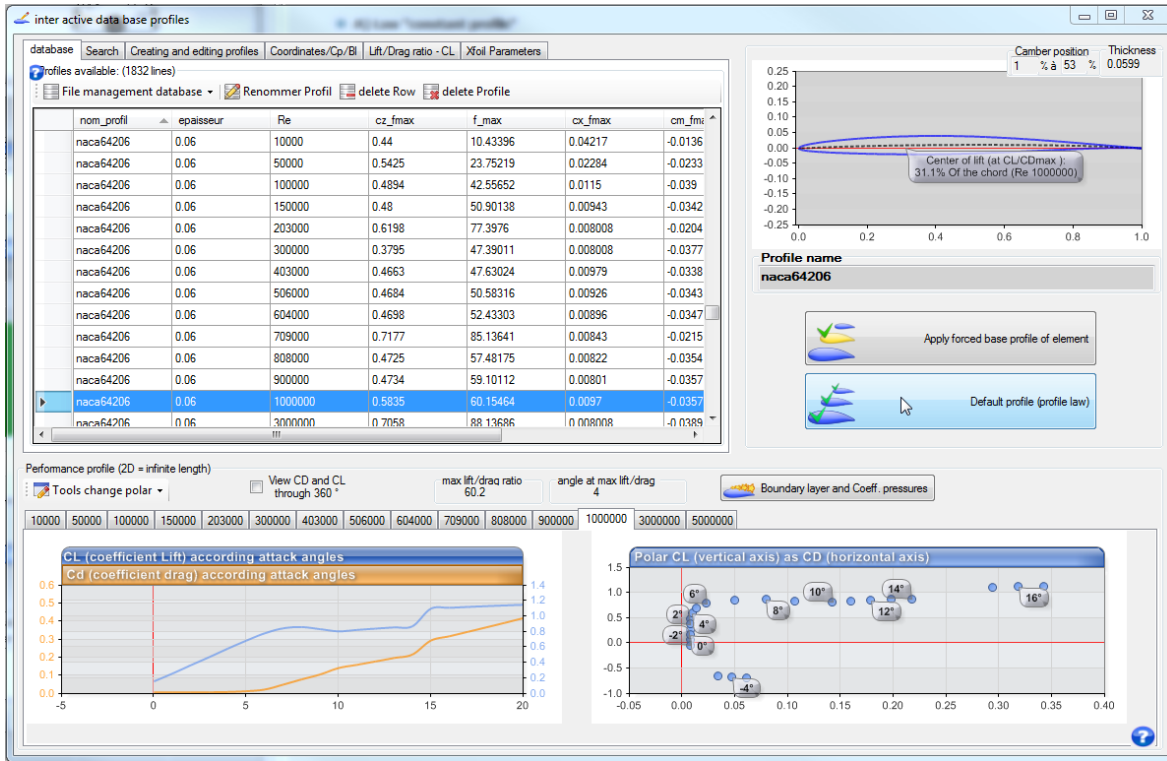


Figura 14. Ventana de la base de datos de múltiples perfiles de álabes contenido por el software Heliciel®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

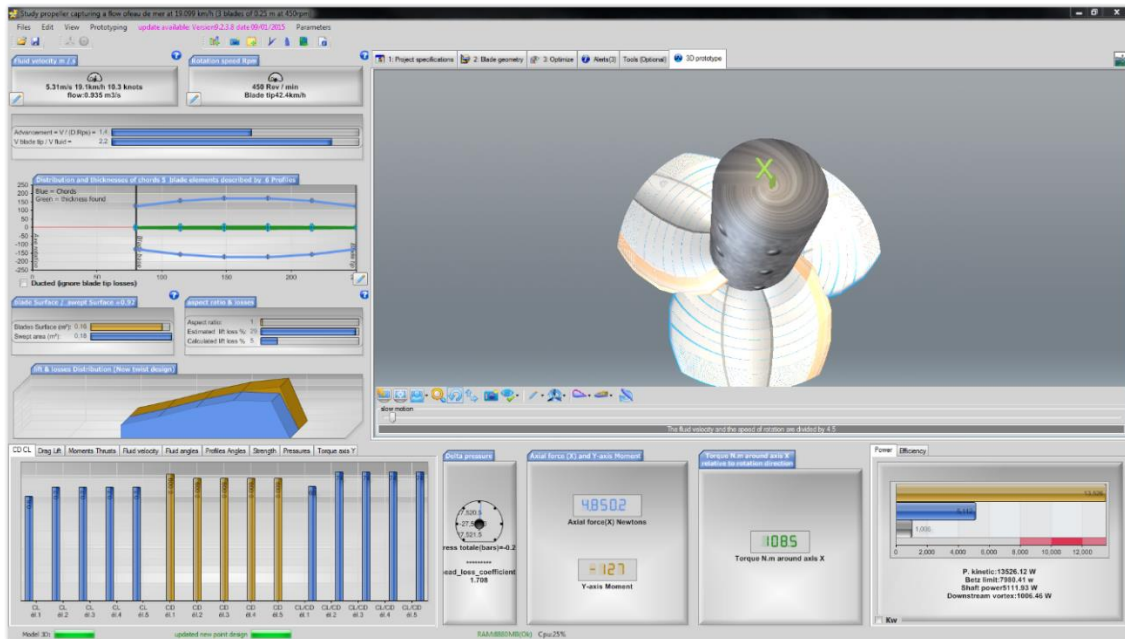


Figura 15. Generación de la turbina Kaplan según los parámetros definidos previamente en el software Heliciel®.

Posteriormente, es necesario definir las condiciones de operación física de la turbina, para lo cual es necesario dirigirse a las pestañas “1: Project specifications” / “1.3: Operating point”, para el caudal debe ingresarse el valor correspondiente en “Enter fluid velocity upstream of the blade” (en este caso el valor de 5.305167) que permita alcanzar un equivalente de 3600 m³/h (el cual puede observarse en la parte central de la ventana en la sección “Enter the volumen flow m³/sec in the duct upstream of the propeller”) y por último se ingresa la velocidad de rotación de la turbina de 450 RPM (Figura 16), estos datos se establecen para este caso en específico debido a los requerimientos que se tienen de las condiciones a las cuales estará sometida la turbina.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

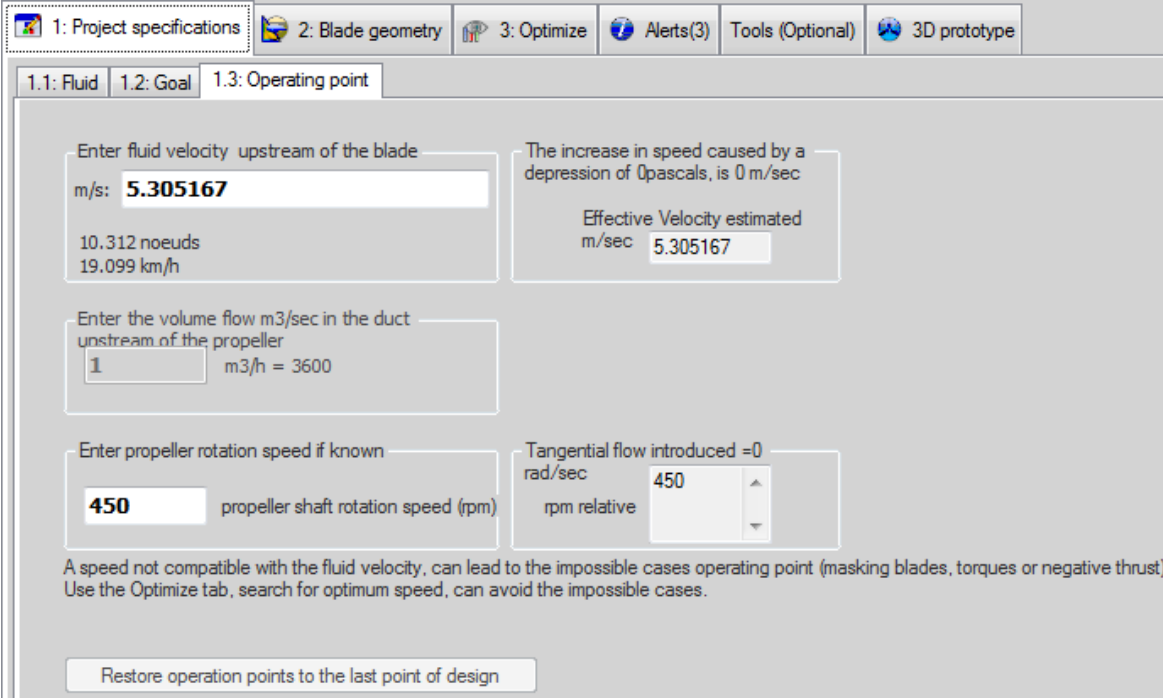


Figura 16. Definición de las condiciones de operación de la turbina en el software Heliciel®

Luego, en la pestaña “3: Optimize”, se selecciona la cantidad de álabes deseados de la turbina en la sección “Change the number of blades”, si se conoce el número de los mismos según la necesidad del análisis requerido (geometrías ya definidas o con énfasis de diseño establecido), siendo en esta ocasión de dos álabes” (Figura 17) y el valor de la profundidad (“Test depth (meters)”) a la cual se encontrará la turbina en el entorno que se desenvolverá. Si no se conoce la cantidad de dichos álabes o se requiere realizar un análisis de eficiencia, la aplicación cuenta con una herramienta propia de optimización, por medio ésta, el programa calcula la cantidad de álabes y el punto de operación óptimo para la turbina (RPM), para lo cual en la misma pestaña “3: Optimize”, se puede dar clic en el botón “Find the number of blades offering the best performance” (o si ya se ha realizado el proceso antes, el nombre de esta función cambia a “Optimize number blades”), ubicado en la sección “Optimize the number of blades” (Figura 17).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

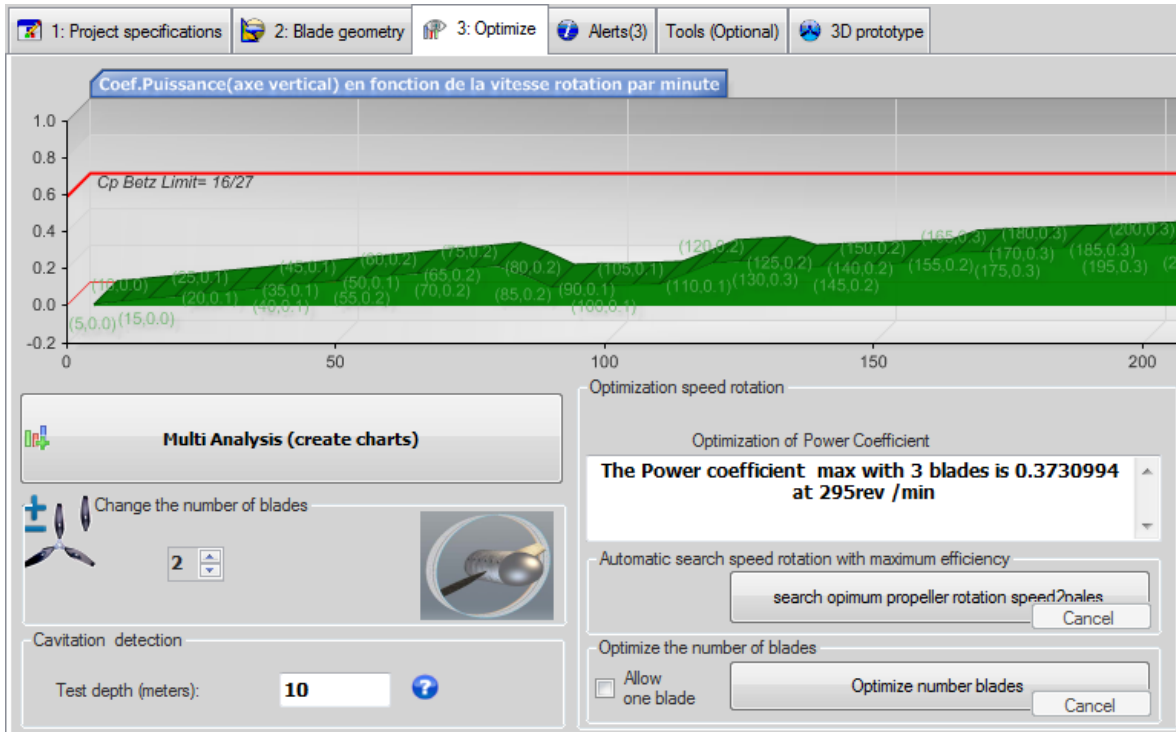


Figura 17. Proceso de selección de la cantidad de álabes y de optimización del rendimiento óptimo de la turbina en el software Heliciel®

Una vez realizado el procedimiento anteriormente descrito, el programa genera nuevamente el modelo tridimensional de la geometría con la cantidad de álabes establecido (Figura 18), ya sea por parte del usuario (si se realiza el proceso de forma manual) o por el programa Heliciel® (si se realiza el proceso de optimización de álabes).

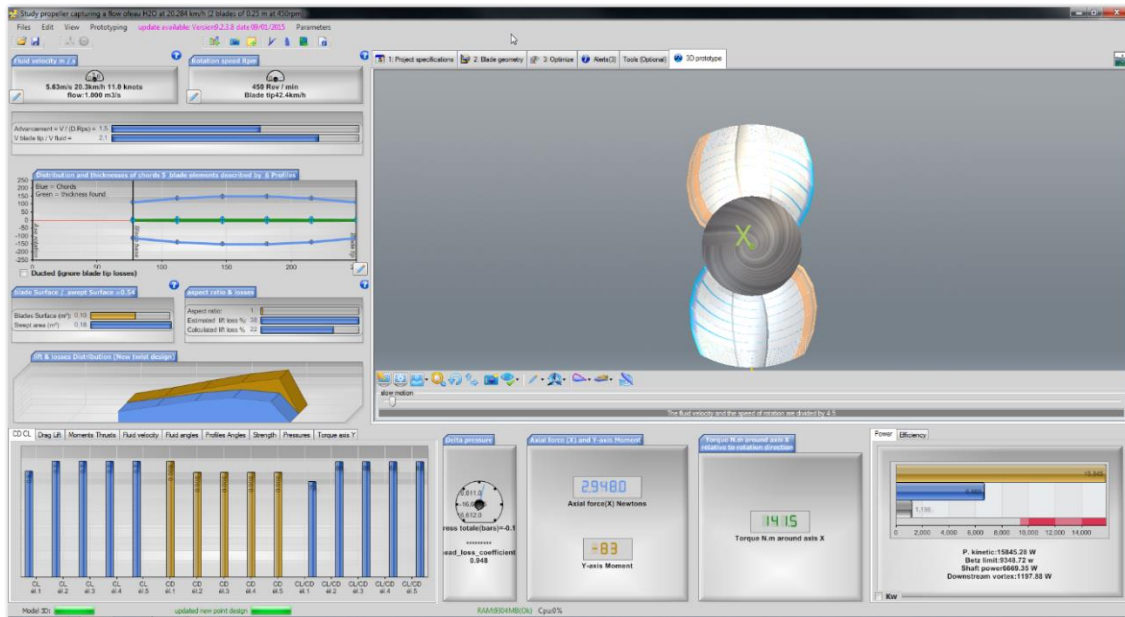


Figura 18. Generación de la turbina con la cantidad de álabes requeridos en software Heliciel®.

Finalmente, para trabajar con el modelo es necesario exportar la geometría a una aplicación especializada en las operaciones con cuerpos o superficies, para esto, se guarda la geometría generada en Heliciel® en formato .IGS, el cual es un formato de geometrías ampliamente soportado por múltiples aplicaciones especializadas en el diseño computacional. Los pasos que se deben realizar para guardar el archivo con este formato son: dar clic en “File”, luego en “Export IGS format”, posteriormente dar un nombre al archivo y finalmente “guardar” (Figura 19 y Figura 20).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

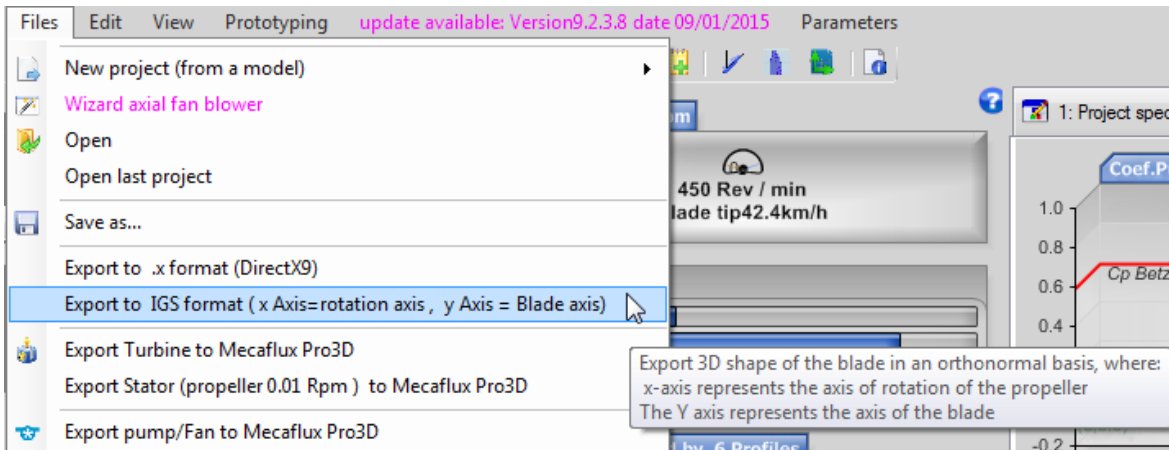


Figura 19. Proceso de guardado para posterior exportación de software.

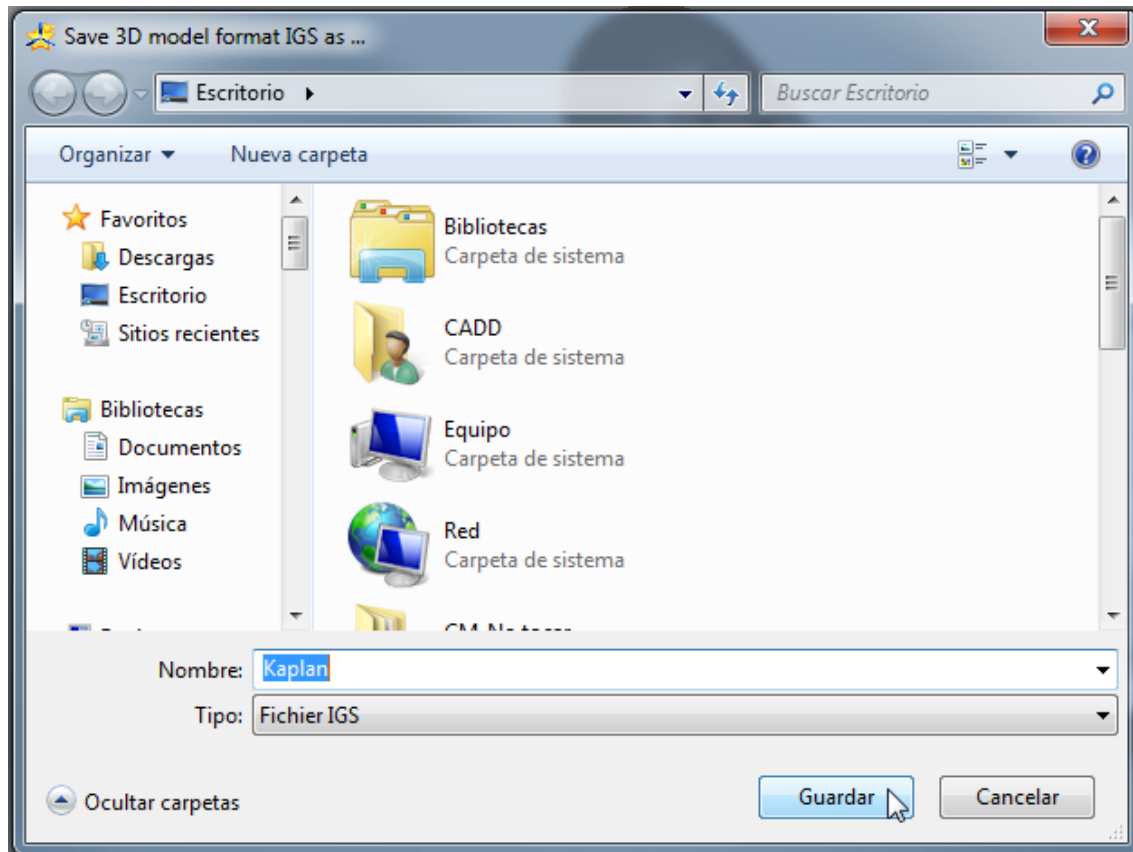


Figura 20. Proceso de guardado para posterior exportación de software.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.1.2. Fase II: Generación del fluido circundante

Una vez completado el diseño en Heliciel® se procede con la generación del fluido circundante de la turbina, con el objetivo de realizar un análisis fluido dinámico de ésta; el archivo .IGS obtenido de Heliciel® brinda un conjunto de secciones transversales representadas por curvas, correspondientes a un álabe de la turbina, por lo que es necesario utilizar técnicas avanzadas de modelamiento para reconstruir y generar nuevamente la turbina, contando con un volumen tridimensional con el cual trabajar, para esto se hizo uso del programa Siemens NX 9.0® el cual ofrece una alta gama de herramientas especializadas en el manejo de superficies y volúmenes.

Inicialmente, se abre NX 9.0® y luego se da clic en “File” / “New” con lo cual se desplegará el cuadro de selección del entorno a trabajar, se selecciona “Model” y se da un nombre al archivo al igual que una ruta de guardado y finalizado esto se da clic en “Ok” (Figura 21).

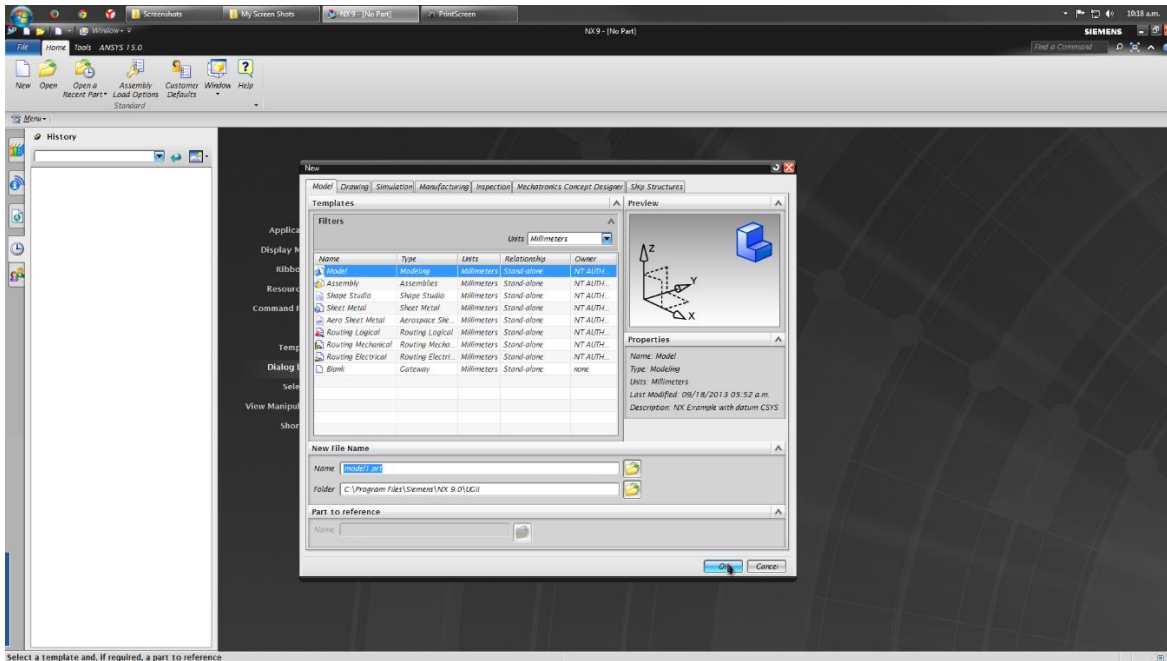


Figura 21. Selección del entorno requerido para la generación del modelo de una turbina Kaplan en NX9.0®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Una vez dentro del entorno del programa se procede a importar el archivo que contiene las curvas del álabe, para lo cual se sigue la ruta: “File” / “Import” / “IGES” (Figura 22), luego aparece la ventana de importación del archivo, en donde se da clic en el icono de búsqueda para ubicar el archivo IGES generado anteriormente en Heliciel®, se selecciona dicho archivo y se da clic en “Ok” en la ventana de búsqueda y una vez más en la ventana de importación que se abre dentro de la ventana de trabajo del programa (Figura 23).

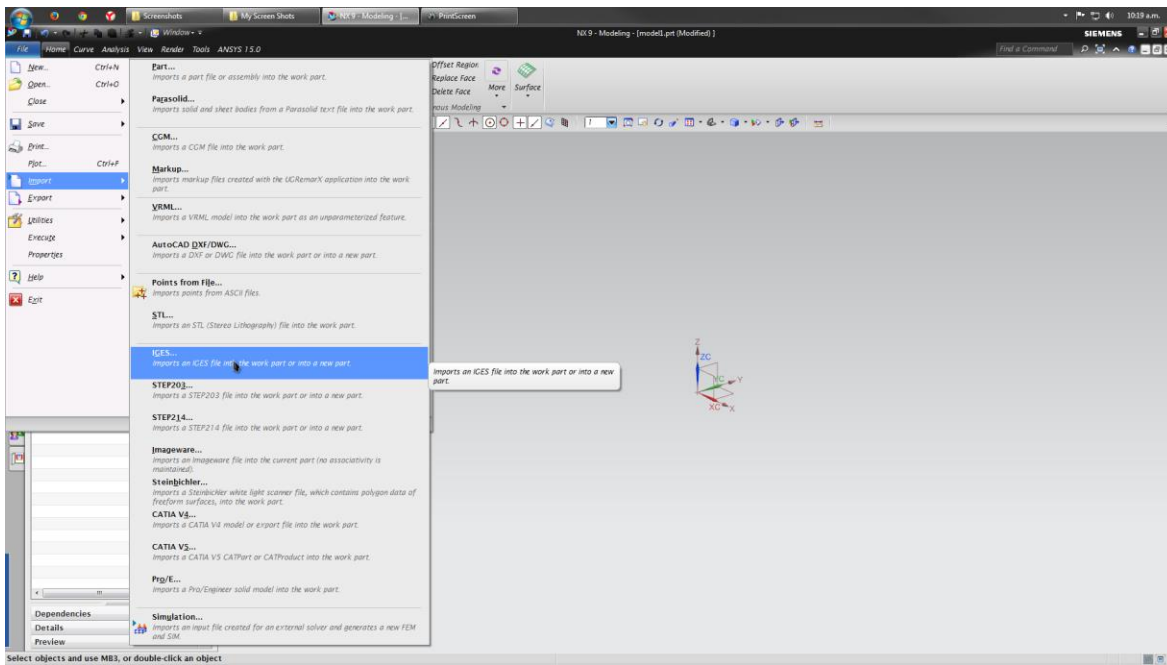


Figura 22. Proceso de importación del modelo a NX9.0®.

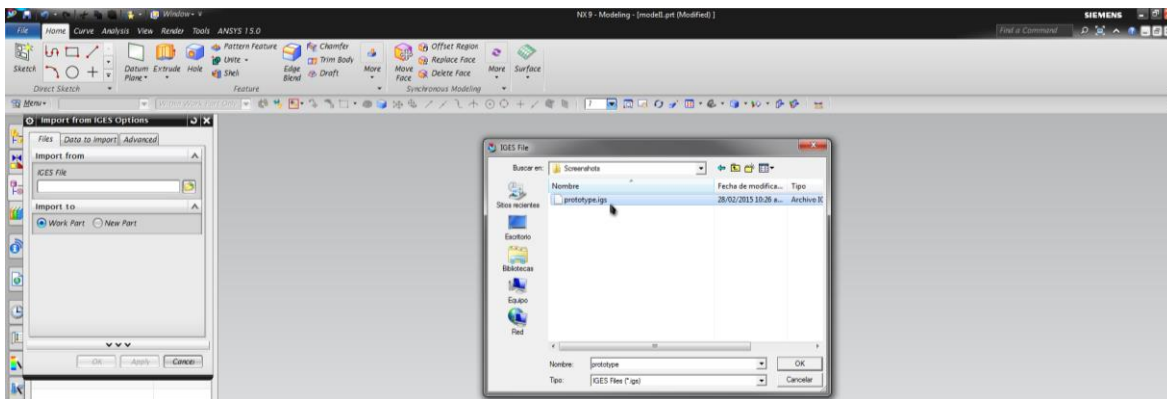


Figura 23. Proceso de importación del modelo a NX9.0®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Finalizado el proceso de importación se cuenta con seis curvas en la ventana de trabajo, las cuales representan la geometría del álabe de la turbina (*Figura 24*).

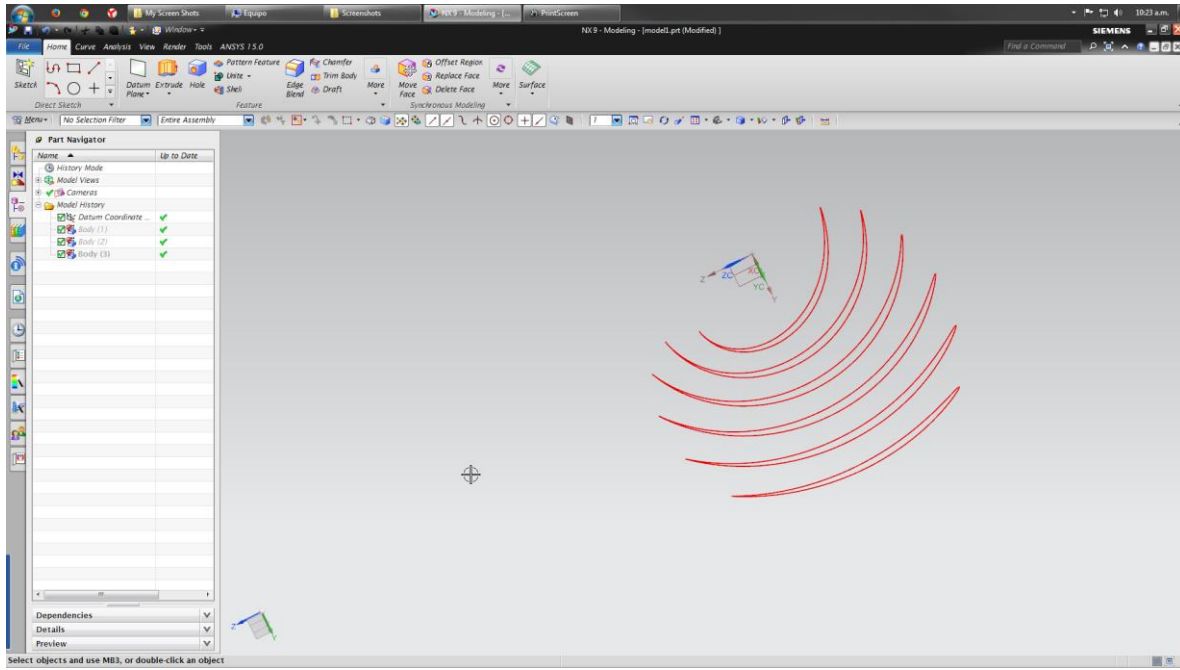


Figura 24. Curvas obtenidas en la importación del álabe de la turbina en el software NX9.0®.

Posteriormente, se procede a generar una superficie que describa la forma del álabe usando las curvas como base, para este procedimiento se utiliza la herramienta “*Through Curves*” (*Figura 25*), la cual usa curvas cerradas para generar una superficie de unión entre las mismas, al dar clic sobre dicha herramienta se abre una ventana de opciones, en la cual se inicia en la zona superior de la misma en la región “*Sections*”, para lo cual se comienza seleccionando una de las curvas que se encuentran ubicadas en los extremos (*Figura 26*), luego se da clic en “*Add New Set*” dentro de la misma ventana de la herramienta y se selecciona la siguiente curva, generándose como resultado una superficie entre ambas curvas (*Figura 27*), después de esto se repite el mismo procedimiento para las curvas faltantes, y al finalizar se da clic en “*Ok*” para terminar la operación y cerrar la herramienta (*Figura 28*).

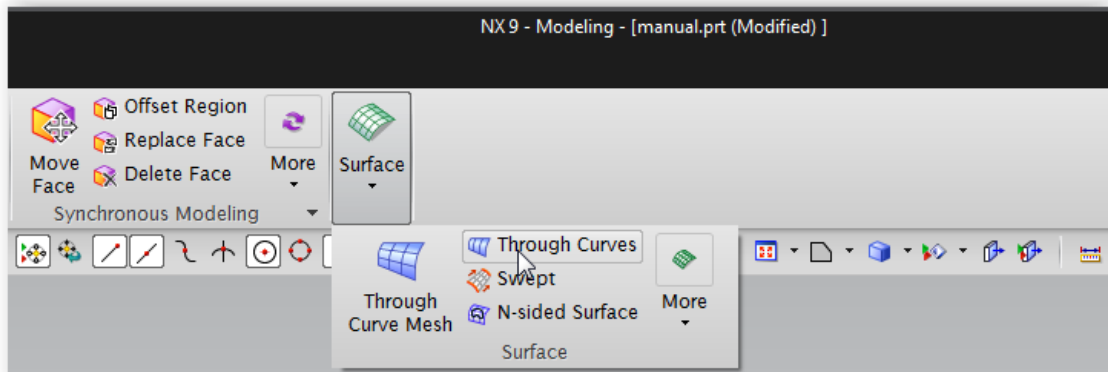


Figura 25. Generación del álabe de la turbina Kaplan a partir de las curvas en el software NX9.0®.

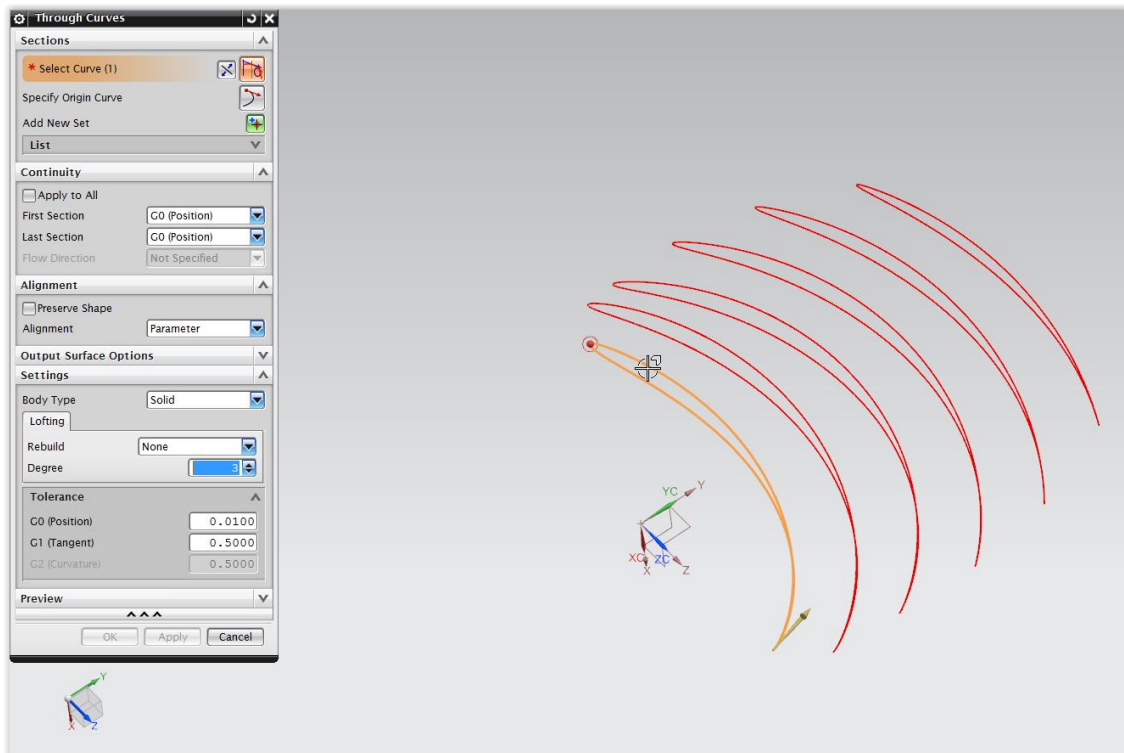


Figura 26. Generación del álabe de la turbina Kaplan a partir de las curvas en el software NX9.0®.

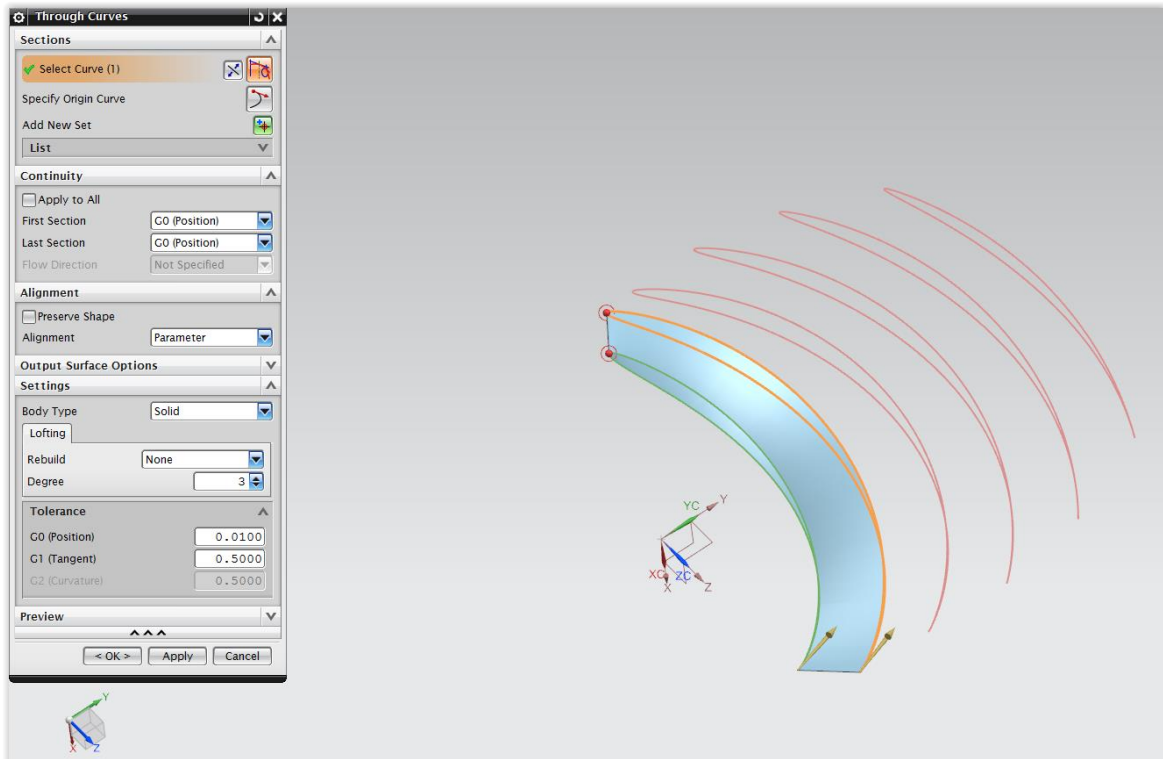


Figura 27. Generación del álabe de la turbina Kaplan a partir de las curvas en el software NX9.0®.

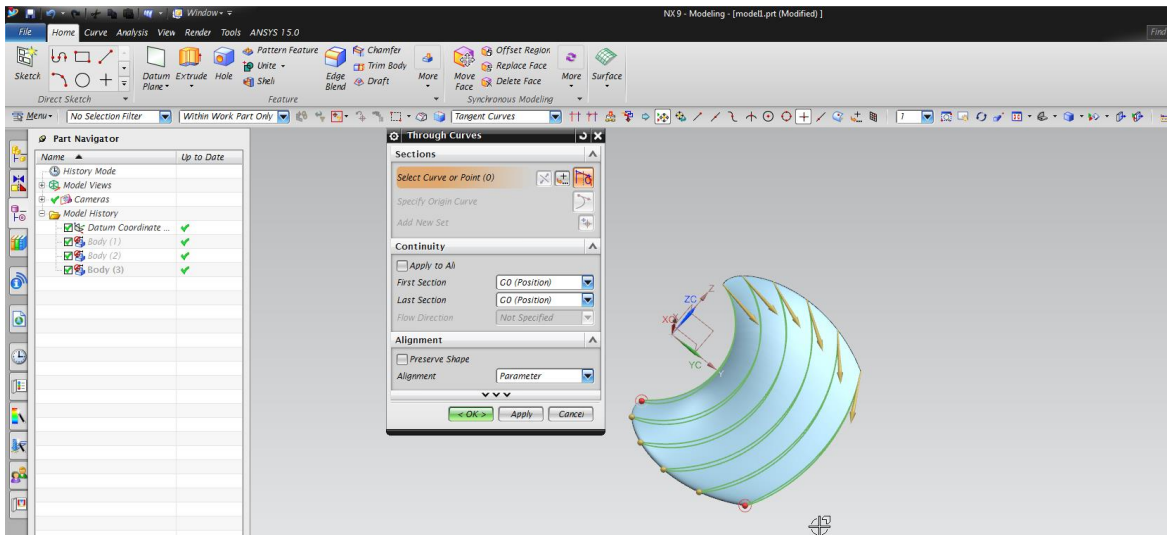


Figura 28. Generación del álabe de la turbina Kaplan a partir de las curvas en el software NX9.0®.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El paso siguiente, es generar dos superficies en los extremos de las curvas del álabe de la turbina para así contar con un volumen cerrado, para esto se emplea la herramienta “N-Sided Surface” que crea una superficie sobre una curva cerrada (*Figura 29* **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), seleccionando inicialmente la curva, seguido de la habilitación de la opción “Trim to Boundary” que sirve para que la superficie generada sea recortada con el perfil de la curva, de lo contrario se crearía una curva que sobre sale de los límites deseados (*Figura 30*) y luego clic en “Ok” para que el programa realice la acción, y por último se repite dicho procedimiento en el otro extremo de la turbina.

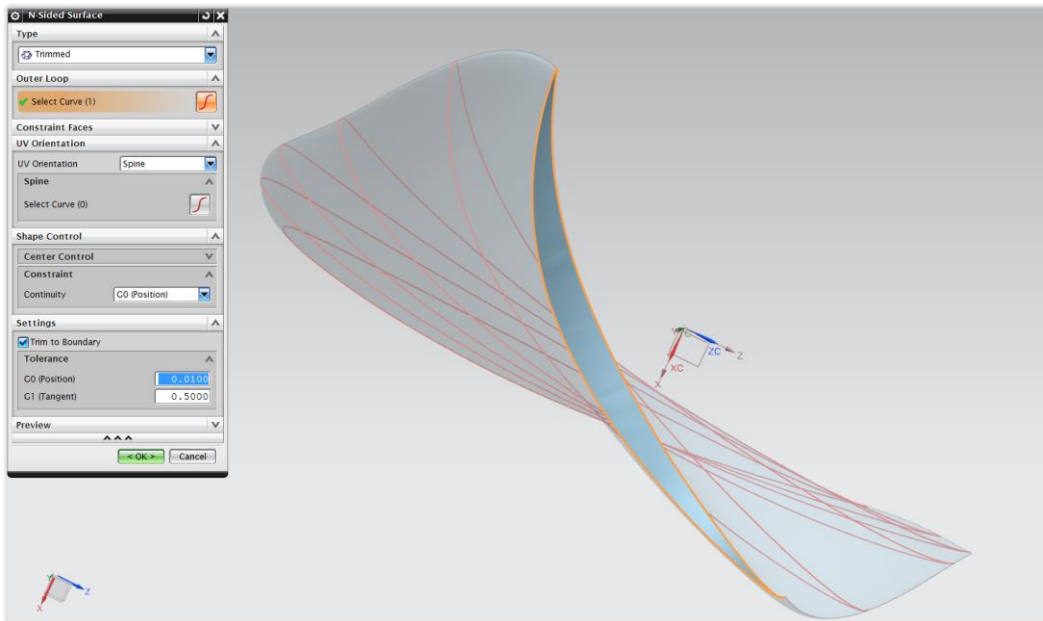


Figura 29. Generación del álabe de la turbina Kaplan a partir de las curvas en el software

NX9.0®.

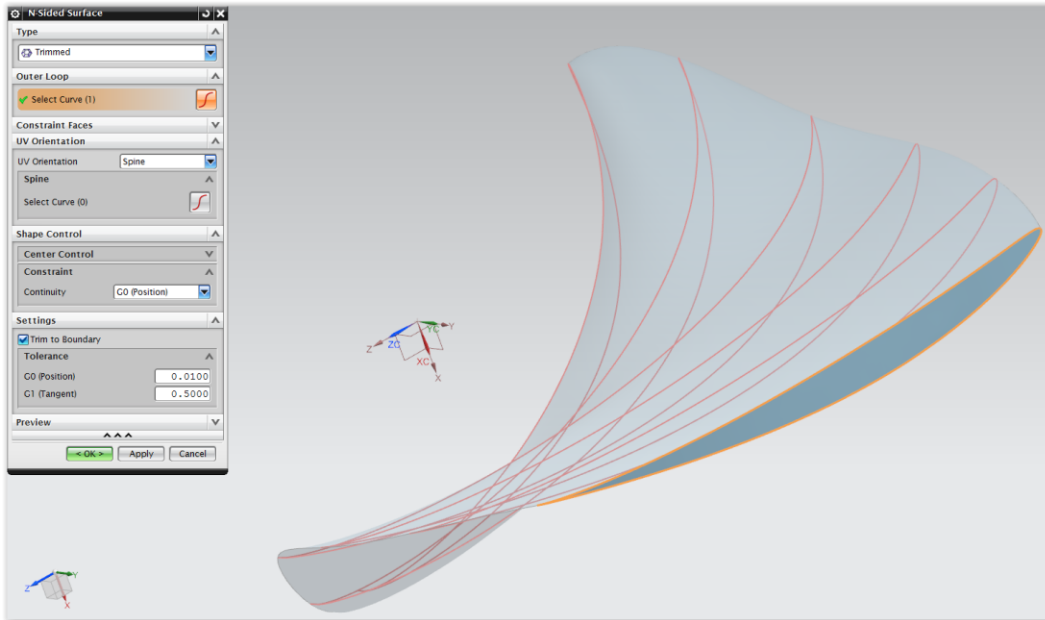


Figura 30. Generación del álabe de la turbina Kaplan a partir de las curvas en el software NX9.0®.

Una vez finalizada la generación de las superficies del álabe de la turbina, es necesario realizar un procedimiento que haga de éstas un solo elemento, para esto se debe ir a “File” y seleccionar el entorno “Shape Studio” (Figura 31), dentro del cual se utiliza la herramienta “Sew” que permite combinar superficies cociendo los bordes comunes (Figura 32).

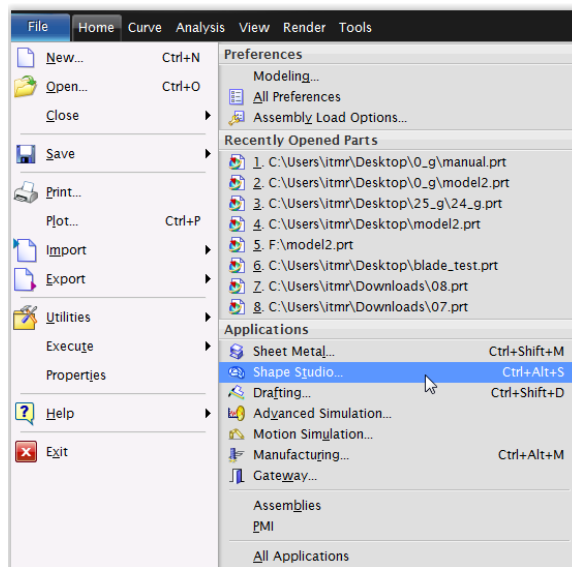


Figura 31. Cambio de entorno en el software NX9.0®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

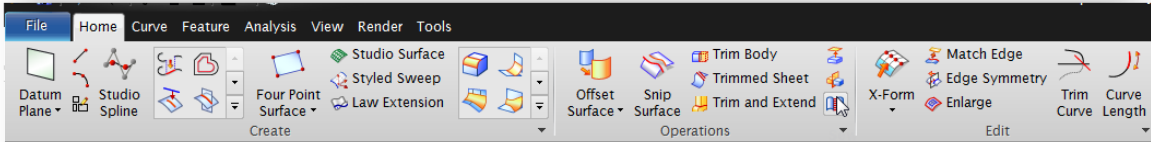


Figura 32. Barra principal de herramientas del entorno Shape Studio en el software NX9.0®.

En la ventana de opciones de la herramienta, en la sección “Target” se selecciona la superficie que contenga la mayor cantidad de bordes comunes a las demás, que para este caso es el eje central, luego en el sector “Tool” se escoge el resto de las superficies, que en esta ocasión son los extremos del álabe (Figura 33) y finalmente se da clic en “Ok” para dar por culminada la operación, obteniendo como producto final el álabe sólido de la turbina Kaplan.

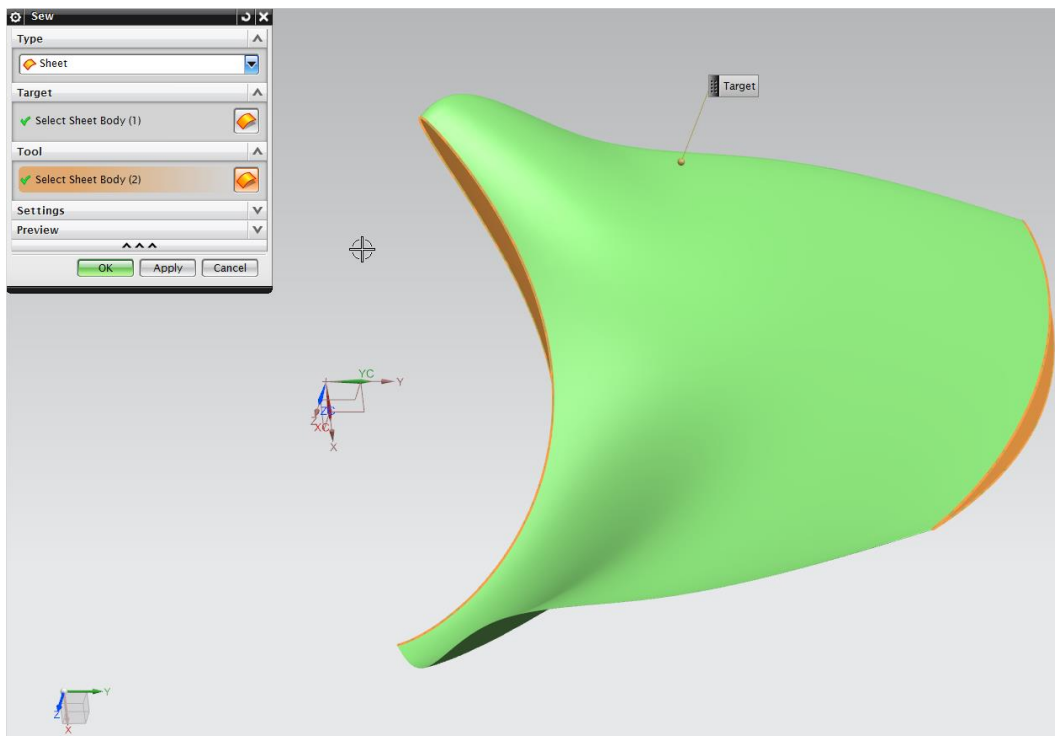


Figura 33. Proceso de cocido (Sew) de las partes del álabe en el entorno Shape Studio del software NX9.0®.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Continuando con la reconstrucción de la turbina Kaplan es necesario generar los álabes faltantes, por lo cual se selecciona el entorno *“Modeling”*, se emplea la herramienta *“Pattern Feature”* (Figura 34) que permite generar copias geométricas de una pieza, en diferentes direcciones y cantidades, la cual al ser activada abre una ventana de opciones en donde se debe dar clic inicialmente en *“Select Feature”*, luego elegir el volumen que se desea copiar, posteriormente escoger en *“Layout”* el tipo de arreglo que se desea realizar, que en este caso es *“Circular”*, especificar el vector alrededor del cual se llevarán a cabo dichas copias en la opción *“Specify Vector”*, determinar en *“Specify Point”* el punto de origen del sistema coordinado, definir *“Count And Pitch”* en *“Spacing”* para que el programa genere las copias a partir de la definición de ángulos, establecer la cantidad de copias requeridas en *“Count”*, que para este caso es de 2 debido a que la turbina que será evaluada presenta dos álabes y en *“Pitch Angle”* el ángulo de distancia entre los elementos replicados (Figura 35), con un valor de 180° ya que corresponde a la distribución espacial de los álabes en los 360° posibles y finalmente clic en *“Ok”* para dar por terminado el arreglo (Figura 36).

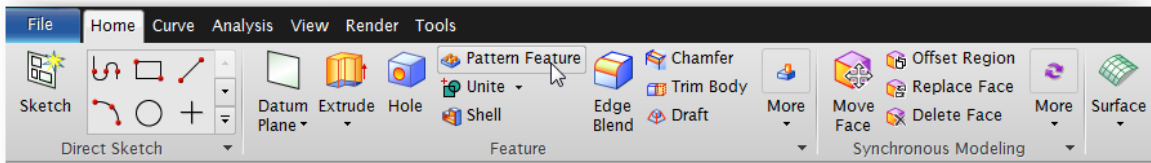


Figura 34. Barra principal de herramientas del entorno Modeling del software NX9.0®.

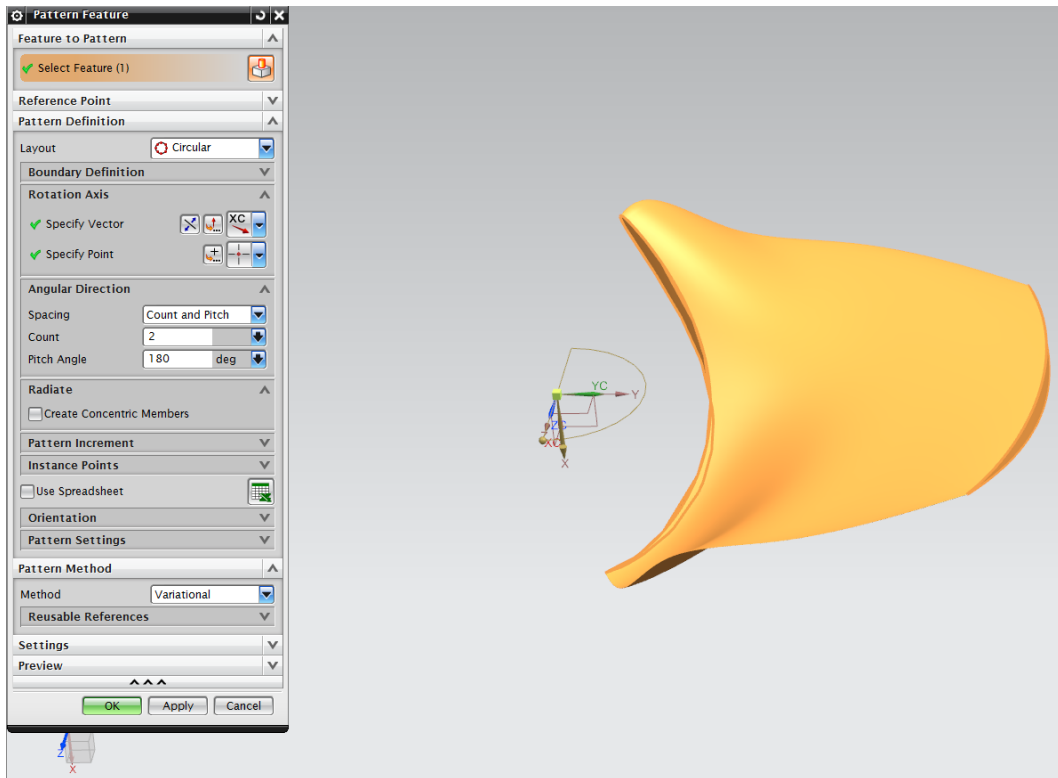


Figura 35. Proceso de generación del álabe faltante por medio de arreglo o patrón (Pattern Feature) en el entorno Modeling del software NX9.0®.

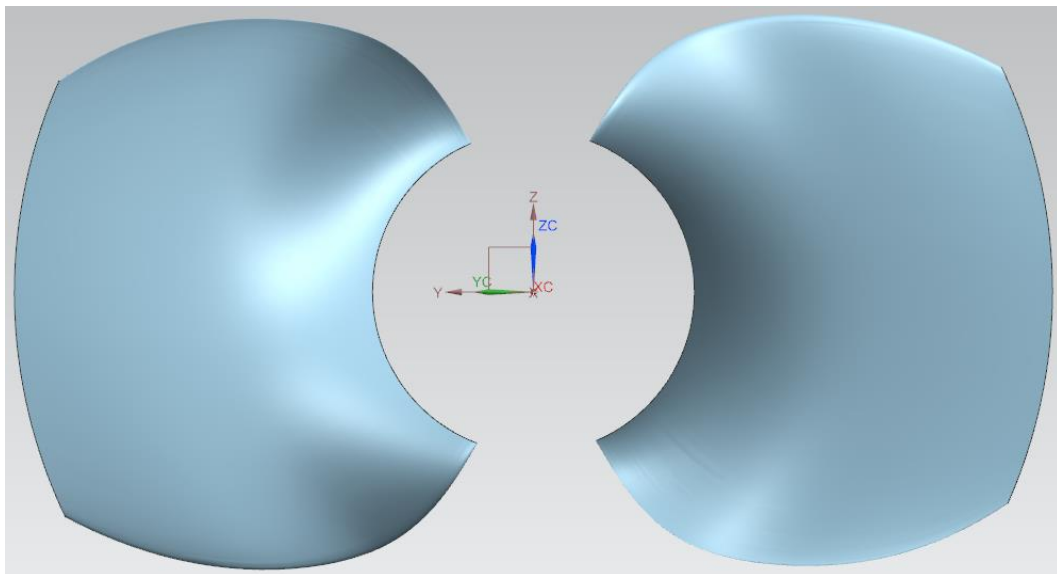


Figura 36. Generación del Álabe faltante de la turbina, luego del arreglo o patrón (Pattern Feature) en el entorno Modeling del software NX9.0®.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Posteriormente se desarrolla el centro de la turbina, el cuál iría acoplado al eje y al generador, creando inicialmente un plano de trabajo sobre el mismo plano en el que se llevó a cabo la generación del arreglo, esto se realiza mediante la herramienta “Datum Plane” en la cual deben ser definidos los ejes de referencia sobre los cuales se creará el plano y si se debe encontrar a una distancia determinada del mismo, para este caso se definen los ejes coordenados YC-ZC con una distancia de 0 mm. Luego se utiliza “Extrude” (Figura 37), se selecciona la opción “Select curve”, se escoge el plano creado con anterioridad, con lo que se abrirá el entorno de diseño, en donde se elige la herramienta “Circle” y se genera una circunferencia que tenga como centro el origen del plano coordenado, asignándole un diámetro de 155.5 mm para este caso, dando clic en la opción “Finish” para dar por terminada la operación (Figura 39), después de lo cual debe establecerse el valor de las longitudes requeridas para la extrusión de dicha geometría, siendo en este caso de aproximadamente 65 mm en ambas direcciones y finalmente clic en “Ok” (Figura 40), arrojando como resultado el volumen presentado en la Figura 41.

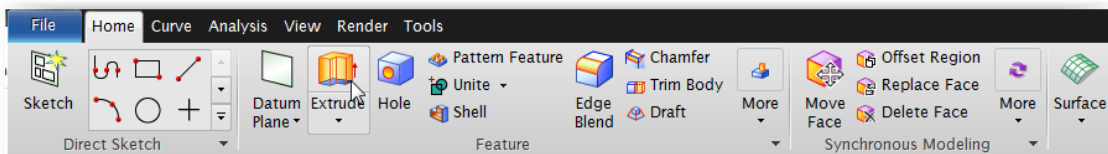


Figura 37. Empleo de la herramienta de extrucción (Extrude) en el entorno Modeling del software NX9.0®.

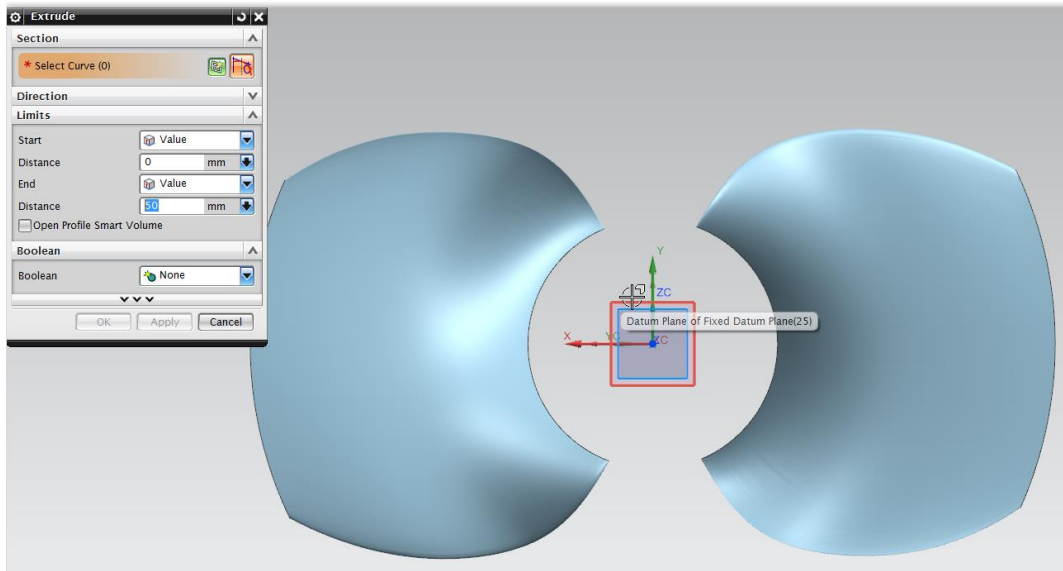


Figura 38. Proceso de extrucción del eje de la turbina en el entorno Modeling del software NX9.0®.

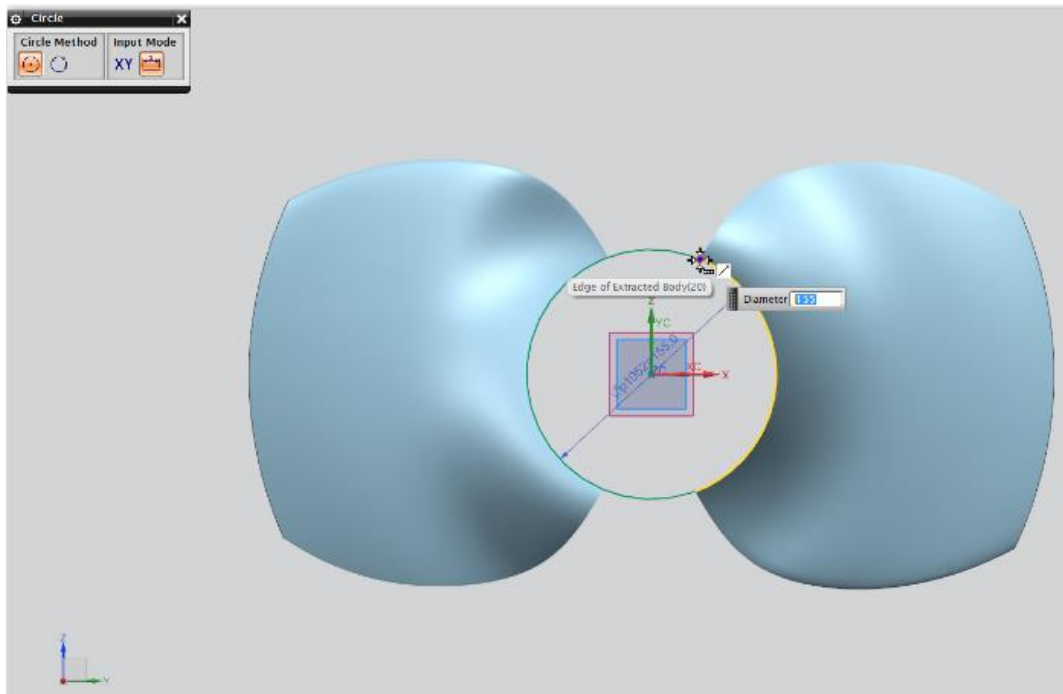


Figura 39. Proceso de extrucción del eje de la turbina en el entorno Modeling del software NX9.0®.

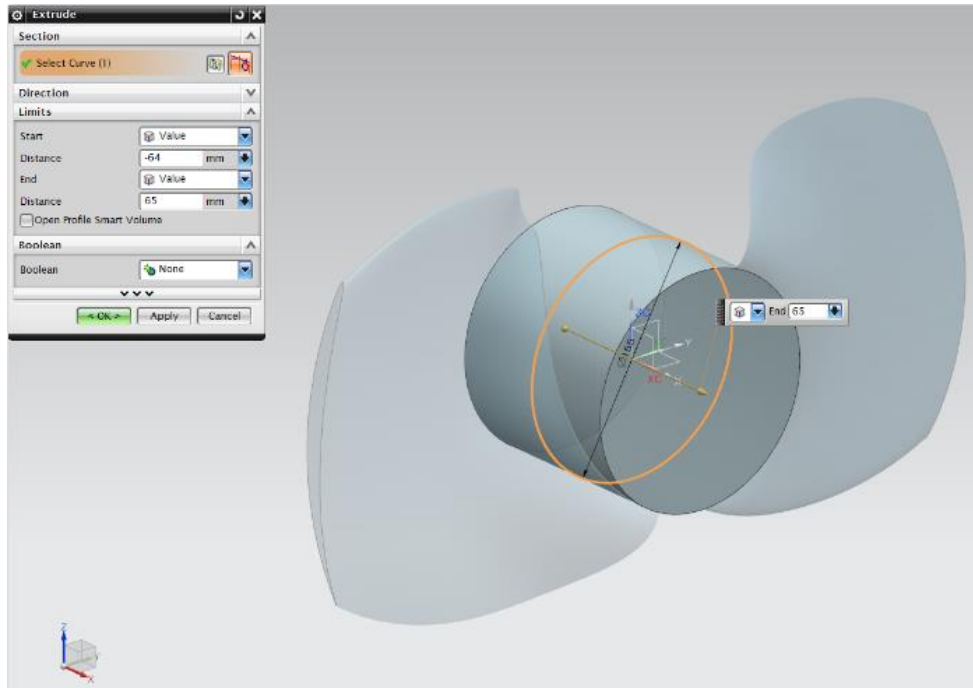


Figura 40. Proceso de extrucción del eje de la turbina en el entorno Modeling del software NX9.0®.

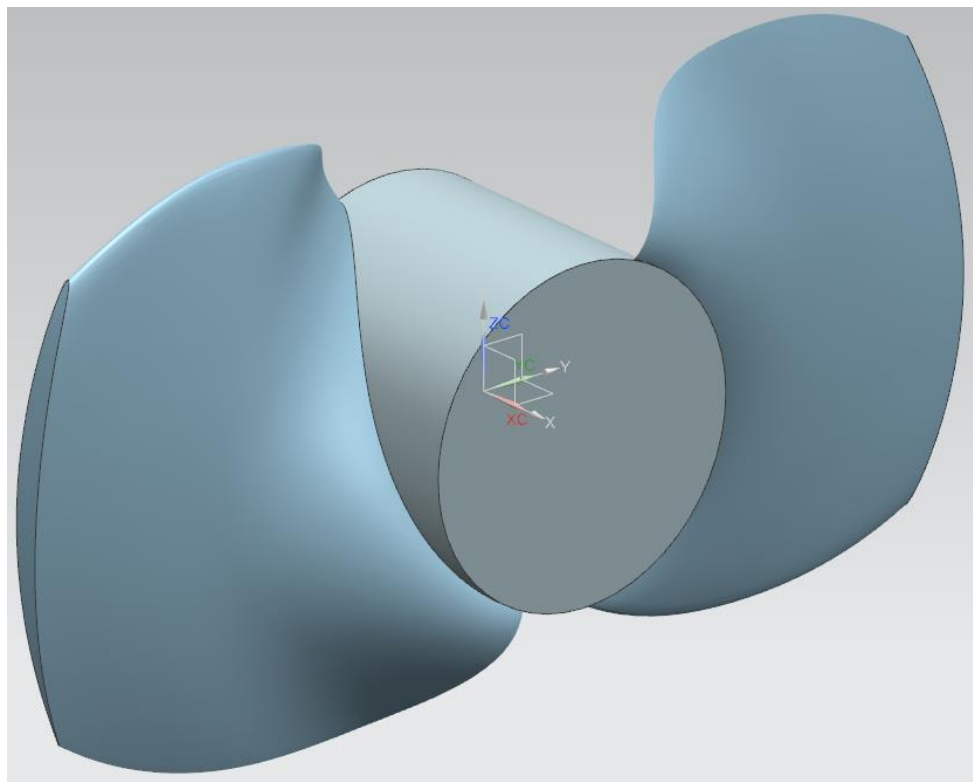


Figura 41. Turbina Kaplan compuesta por álabes y eje en el software NX9.0®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Hasta este momento se cuenta con tres volúmenes, los dos álabes y el eje central, por lo que es necesario combinarlos como un solo cuerpo para continuar con la creación del fluido circundante, para esto se hace uso de la herramienta “Unite” (Figura 42) en donde se selecciona como “Target” el eje central de la turbina y como “Tool” los dos álabes, dando clic en “Ok” para aceptar los cambios y terminar (Figura 43).

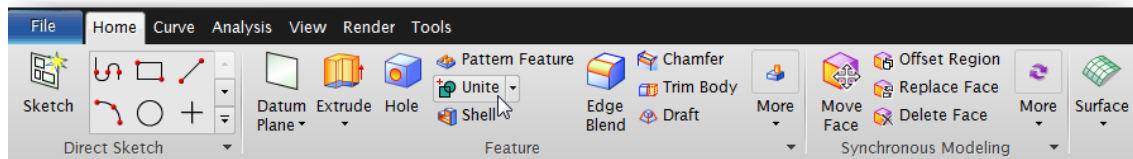


Figura 42. Empleo de la herramienta de Unir (Unite) en el entorno Modeling del software NX9.0®.

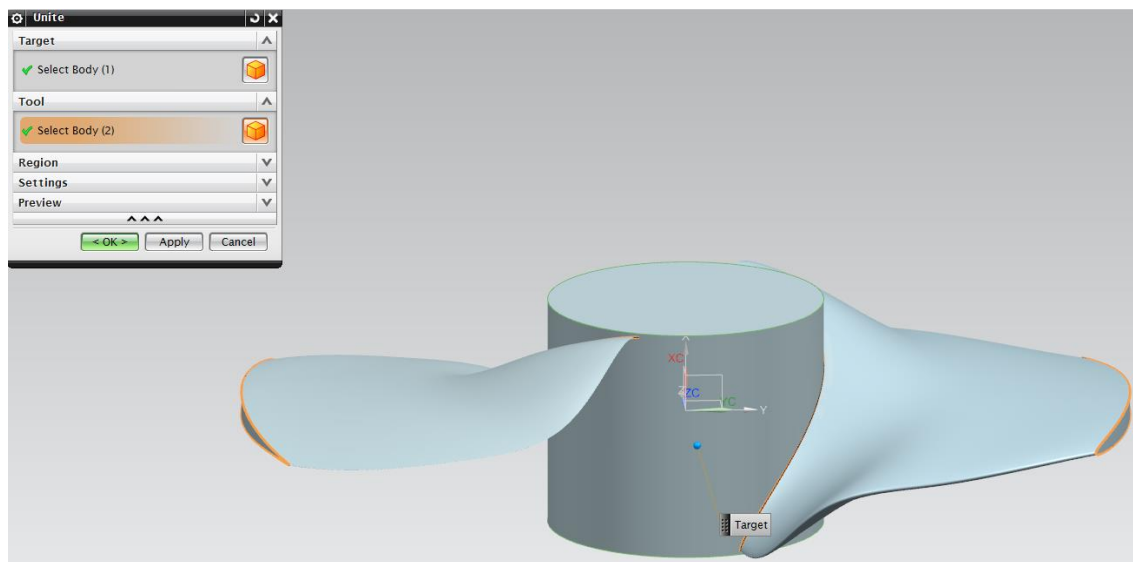


Figura 43. Proceso de unión de los cuerpos que componen la Turbina Kaplan en el software NX9.0®.

Dada la complejidad de la geometría y con el objetivo de reducir tiempos de coste computacional al momento de realizar el análisis fluido dinámico, se realiza un corte simétrico sobre la misma, garantizando una simetría radial; para realizar el seccionado es necesario realizar dos planos sobre cada una de las caras planas del eje central, uno de ellos sobre la cara y el otro con una distancia u offset de 50 mm de ella hacia el exterior del eje,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

empleando nuevamente “Datum Plane”, posteriormente se utiliza la herramienta “Sketch”, se establece “Sketch Type” como “On Plane” y en “Plane Method” como “Inferred”, luego seleccionar el plano que se creó sobre una de las caras del eje central y clic en “Ok” (Figura 44), en el entorno de dibujo se dibuja una línea que irá de extremo a extremo de la turbina, tomando como punto de referencia los bordes interiores y exteriores de ésta (líneas de referencia punteadas, Figura 45), y sobre éstas se trazan líneas de extremo a extremo las cuáles crucen los centros de las líneas de referencia (líneas sólidas, Figura 45), repitiendo el mismo proceso en la otra cara plana del eje central; posteriormente se crean líneas 3D o líneas en el espacio para unir los planos, para esto es necesario cambiar de entorno siguiendo la ruta “File” / “Shape Studio” (Figura 46), ocultando los sólidos para mejorar la visualización a la hora de dibujar las líneas, seleccionándolos, dando clic derecho y dando clic en la opción “Hide” (Figura 47), luego se utiliza la herramienta de “line” (Figura 48) y se trazan líneas de extremo a extremo sobre las guías creadas anteriormente e igualmente se traza una línea entre los centros del bosquejo superior e inferior como puede observarse en la Figura 49.

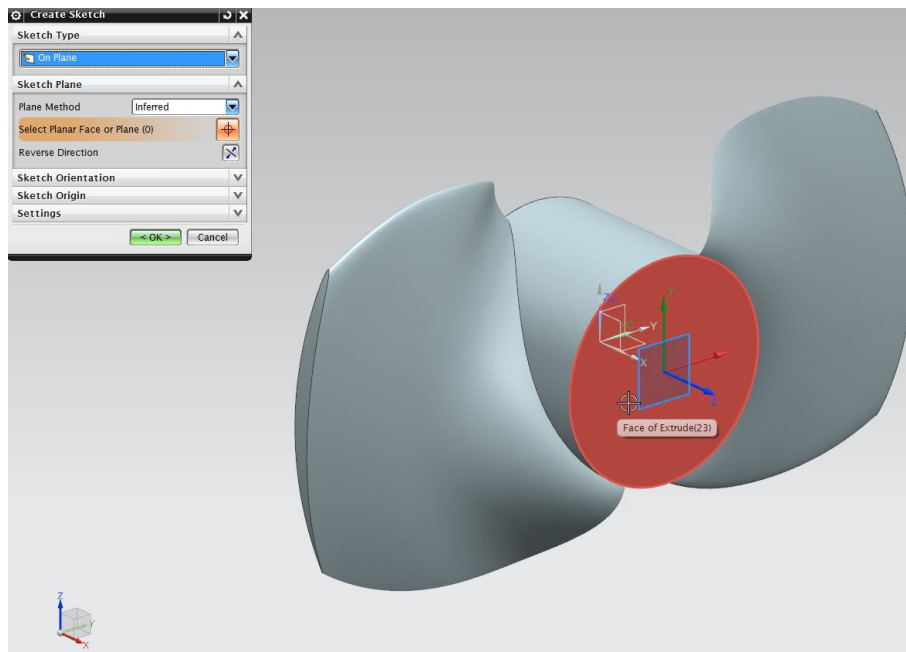


Figura 44. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

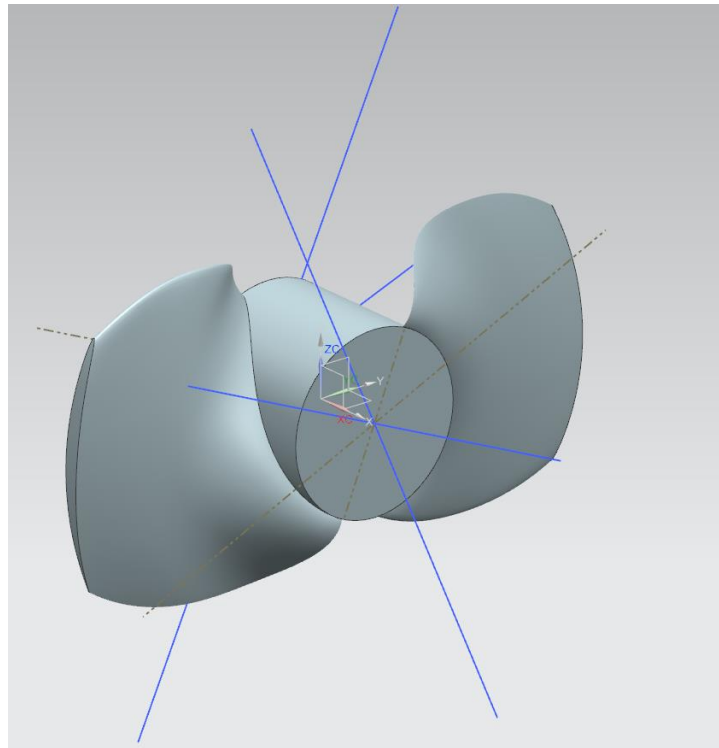


Figura 45. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

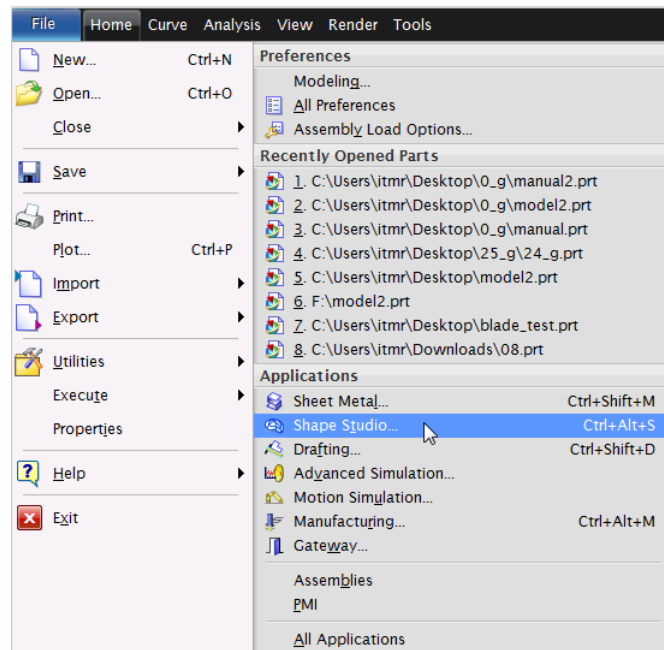


Figura 46. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

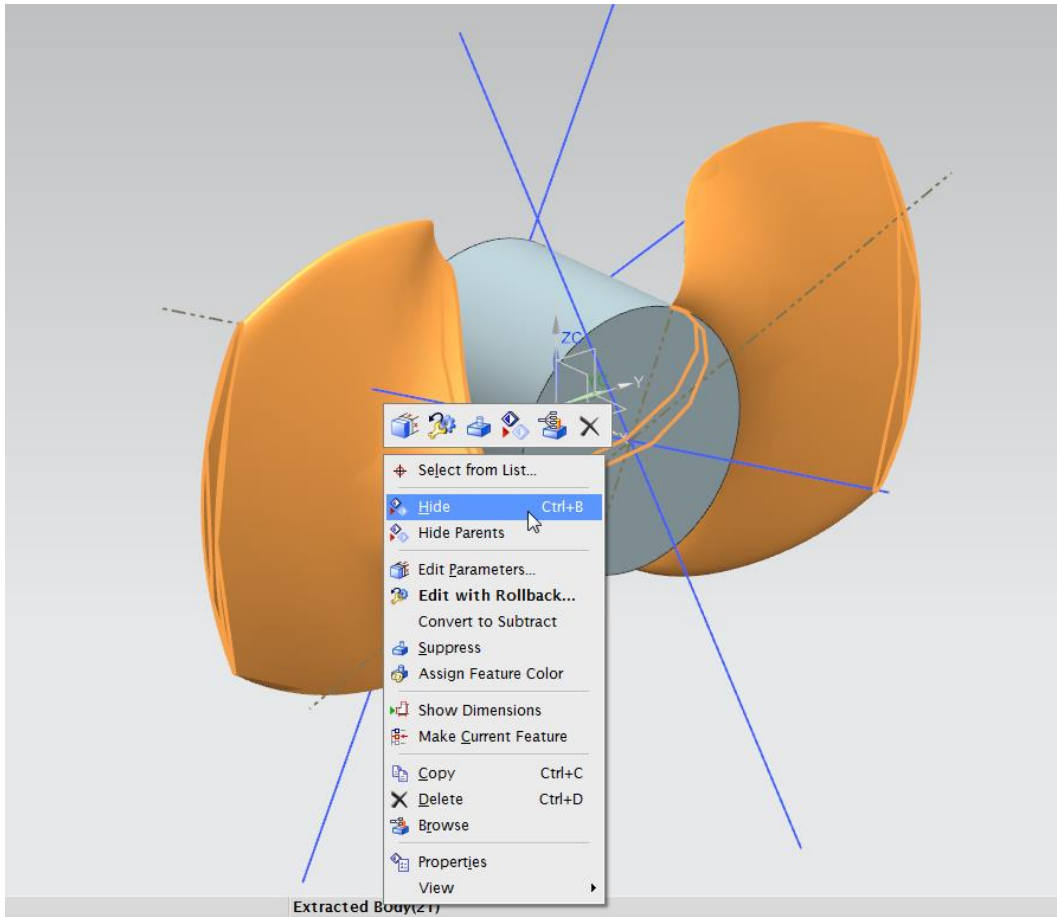


Figura 47. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

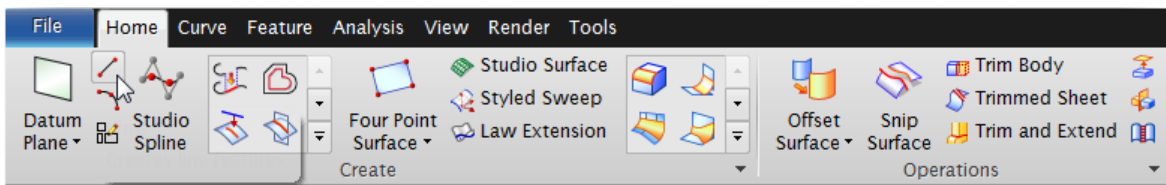


Figura 48. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

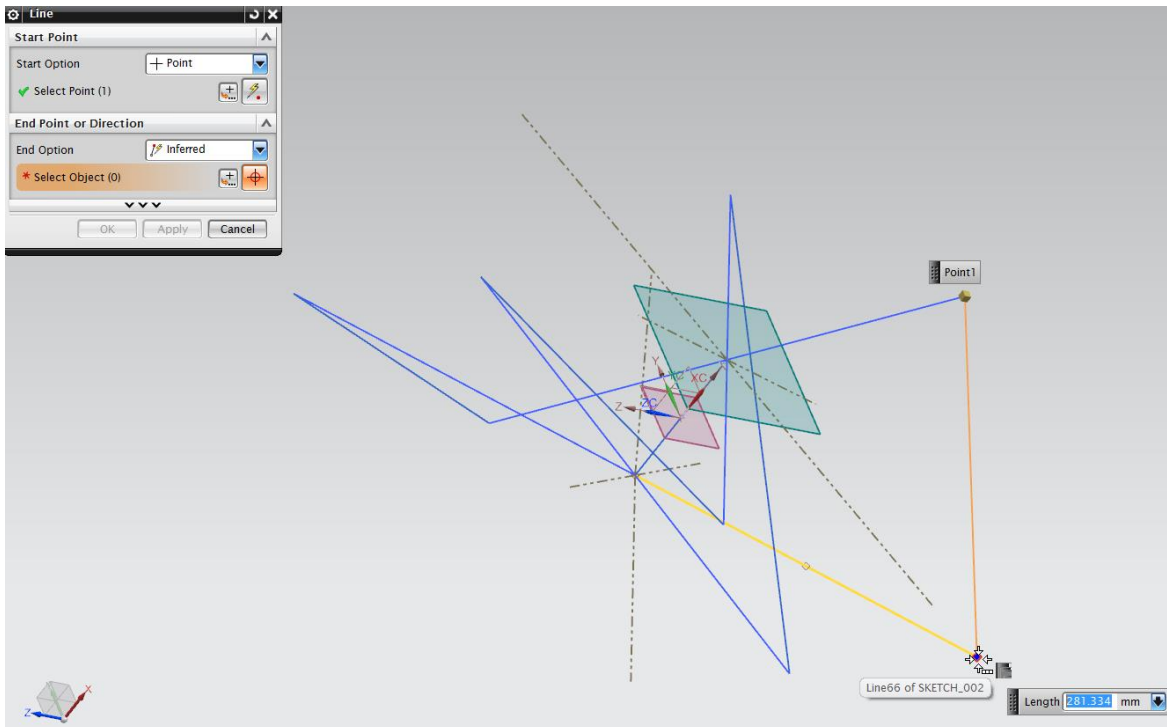


Figura 49. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

Continuando con el procedimiento, se activa nuevamente el sólido desde el “Assembly Navigator”, localizado en la zona izquierda de la interfaz (lugar donde se van generando todas las operaciones que se van realizando durante el proceso), dando clic derecho sobre la operación “Unite” que se desarrolló anteriormente y seleccionando la opción “Show” (Figura 50). Con el fin de garantizar la simetría de la geometría al momento de seccionarla es necesario realizar un corte que siga el contorno de la turbina, para esto se utilizan como base los esbozos creados anteriormente, haciéndose necesario crear una superficie de referencia para proyectar las líneas que fueron dibujadas en el espacio, lo cual se lleva a cabo con la herramienta “Offset Surface” (Figura 51) y con la opción “Select Face” activada elegir la cara requerida, que en caso es el cilindro del eje central y posteriormente se da una distancia para dicho offset de manera aleatoria, que en esta ocasión se trabajó con un valor de 200 mm (Figura 52) y para finalizar se da clic en “Ok”.

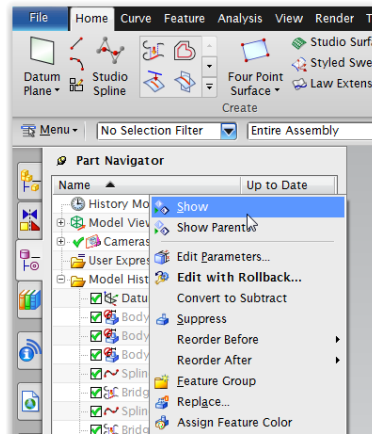


Figura 50. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

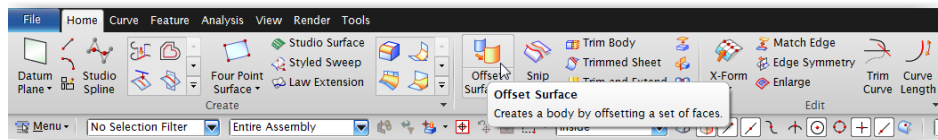


Figura 51. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

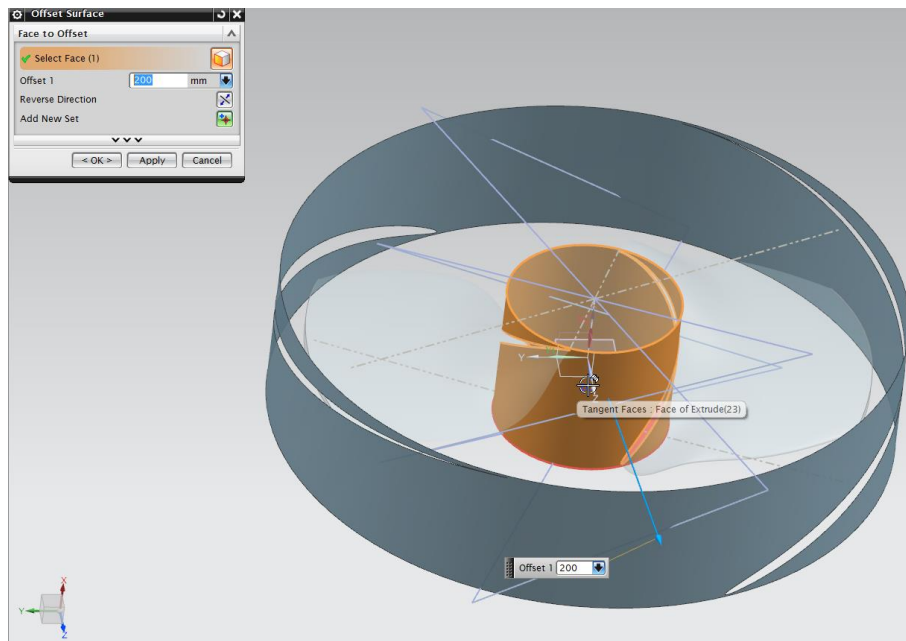


Figura 52. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

A continuación se proyectan las líneas externas que unen los bosquejos superior e inferior, para esto se usa la herramienta “Project Curve” (Figura 53), una vez activa se selecciona para la opción “Curves or Points to Project” la curva a proyectar y para “Objects to Project to” la superficie sobre la cual se desea proyectar la línea, y se finaliza dando clic en “Ok” (Figura 54); después se oculta la superficie proyectada utilizando nuevamente la opción “Hide” como se explicó en pasos anteriores, y se realiza el mismo procedimiento de proyección para las líneas internas sobre la cara exterior del eje central (Figura 55).

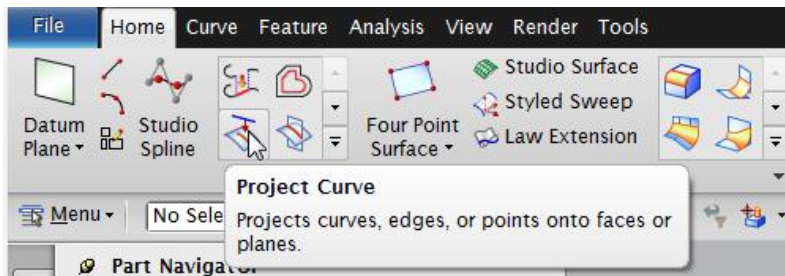


Figura 53. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

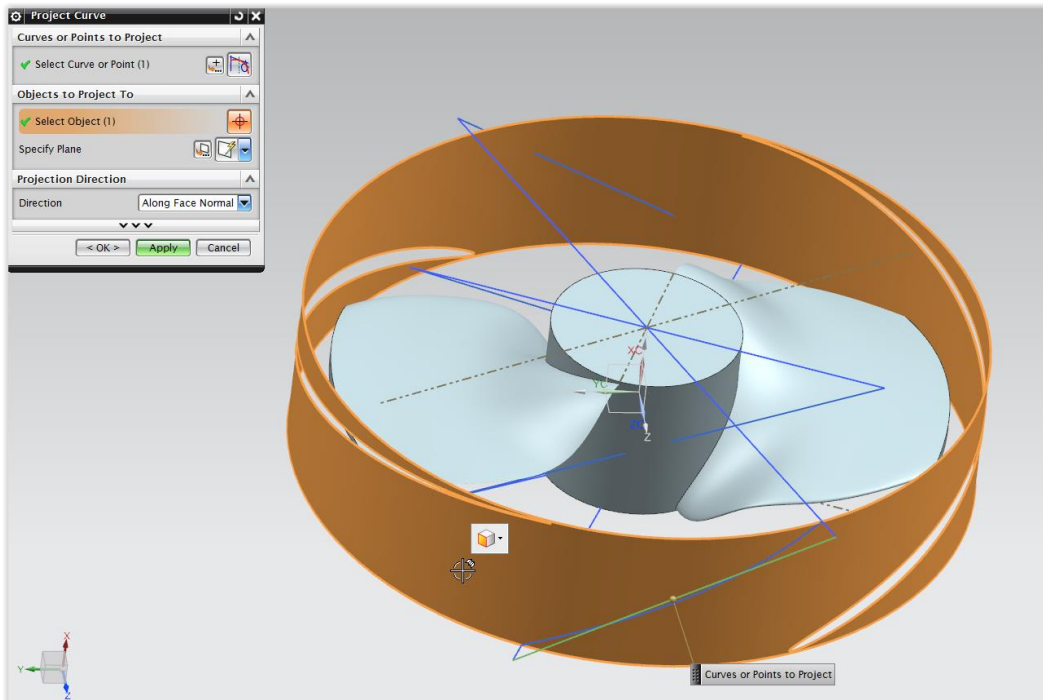


Figura 54. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

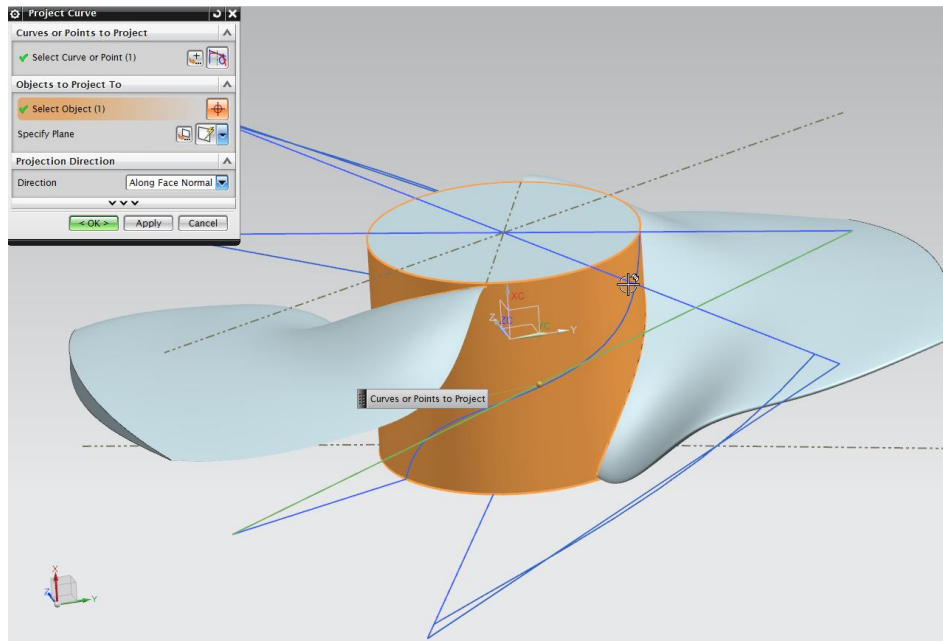


Figura 55. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

El siguiente paso es la creación de una superficie para el corte de la geometría, usando como base el conjunto de líneas anteriormente creadas, el primer paso es unir los bordes de las líneas proyectadas de manera que éstas formen un contorno cerrado, para esto, empleando la herramienta “Line” se crean líneas que unan cada uno de los extremos de las líneas proyectadas sobre un mismo plano (Figura 56 y Figura 57), para la creación de la superficie de corte se utiliza la herramienta “Through Curve Mesh” (Figura 58), esta herramienta crea superficies o cuerpos a través de una sección de mallado en una dirección y guías en otra dirección donde la forma se ajusta a través de la malla de curvas, con la herramienta “Primary Curves” activa se elige una de las líneas como se muestra en la Figura 59, luego se da clic en “Add New Set” (Figura 59) y se selecciona la línea paralela a ella, posteriormente con “Cross Curves” activado se aplica el mismo procedimiento, pero esta vez para las líneas de los extremos como puede observarse en la Figura 60, para finalizar la operación se da clic en “Apply” y se generará una de las superficies de corte (Figura 60), se debe realizar el mismo proceso para la sección restante de líneas y como producto final se tendrán las superficies necesarias para poder realizar el corte (Figura 61).

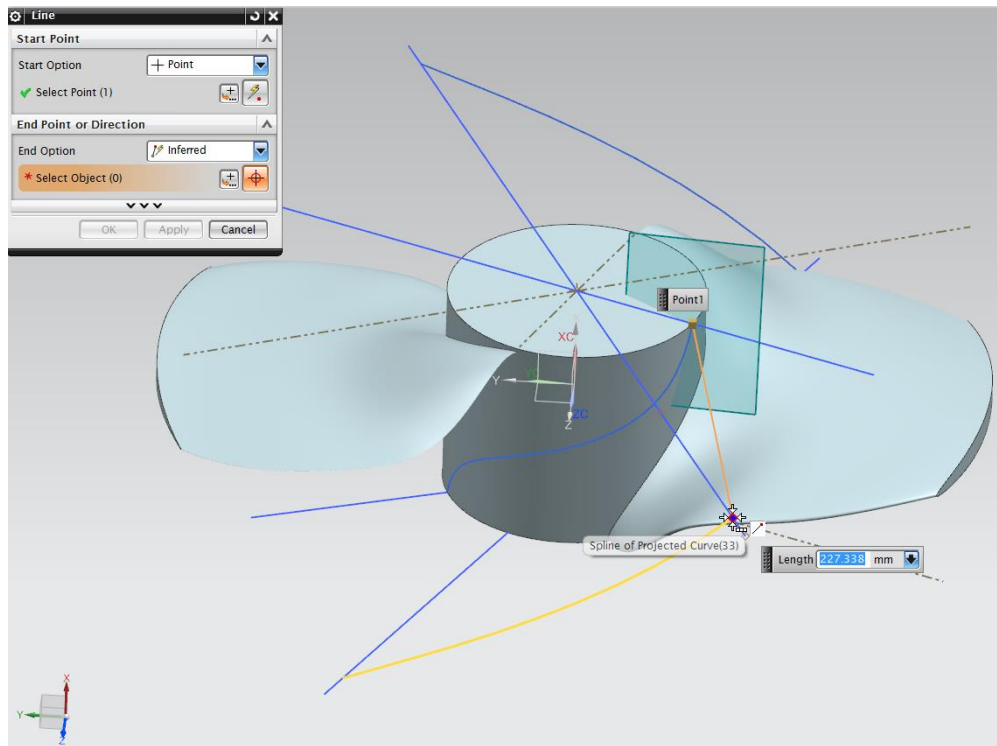


Figura 56. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

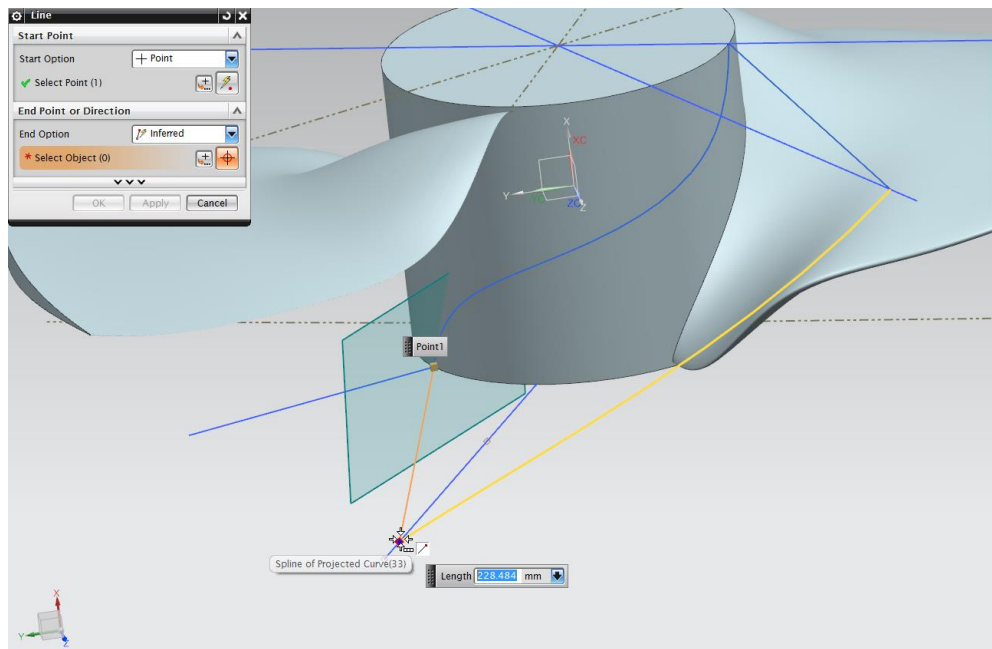


Figura 57. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

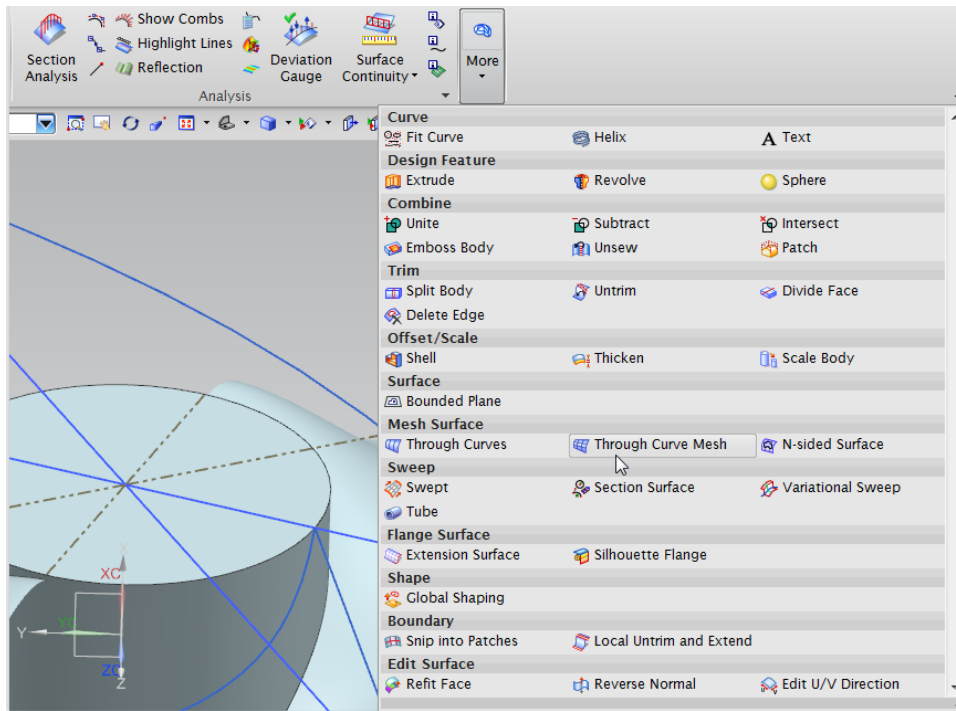


Figura 58. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

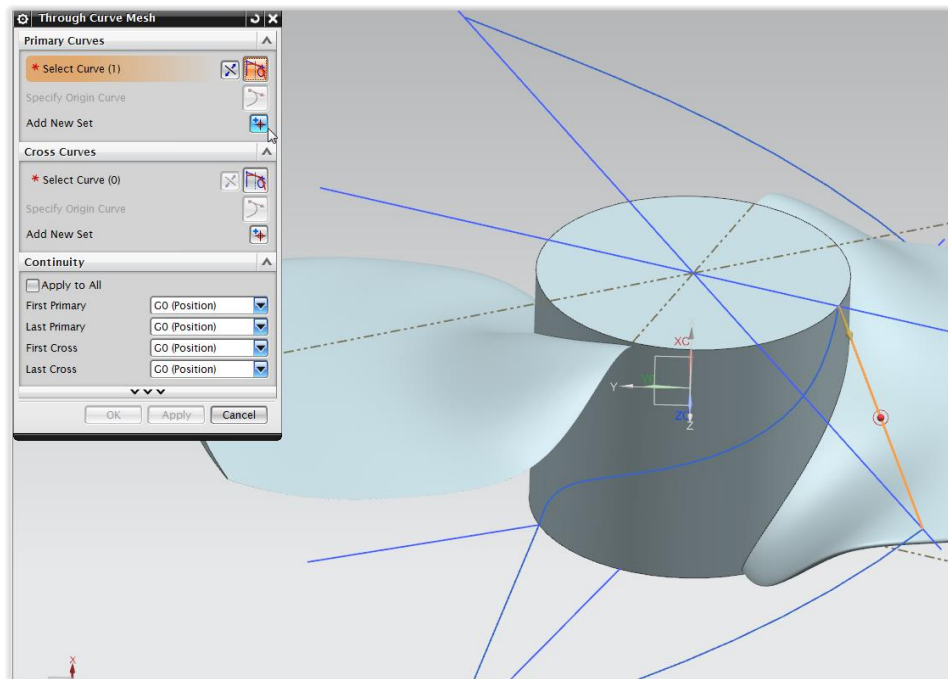


Figura 59. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

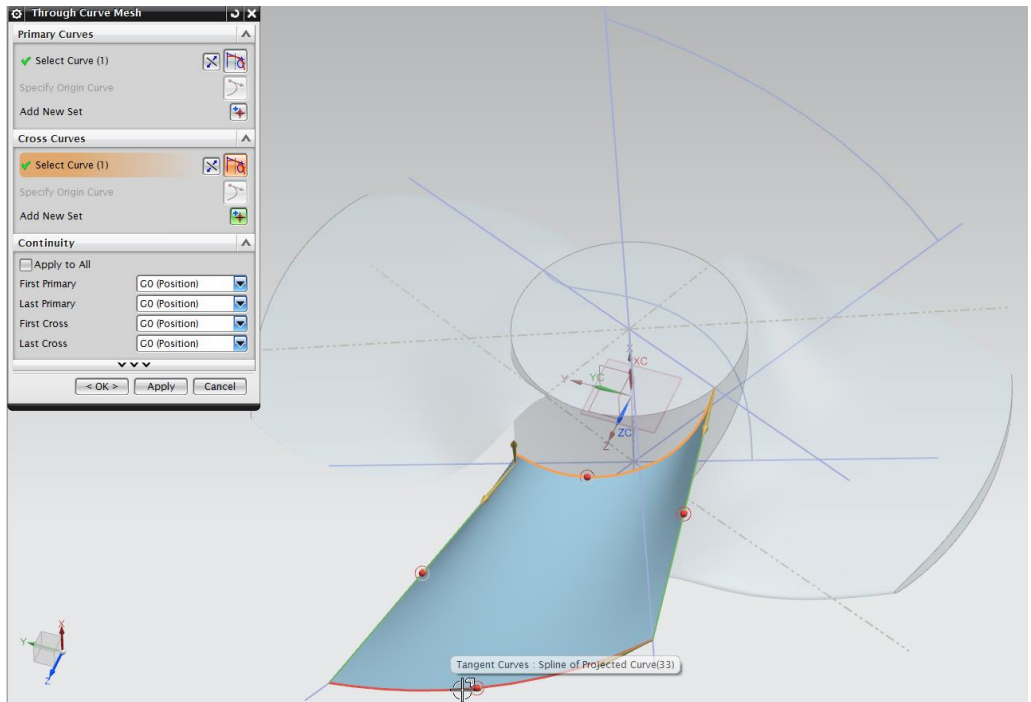


Figura 60. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

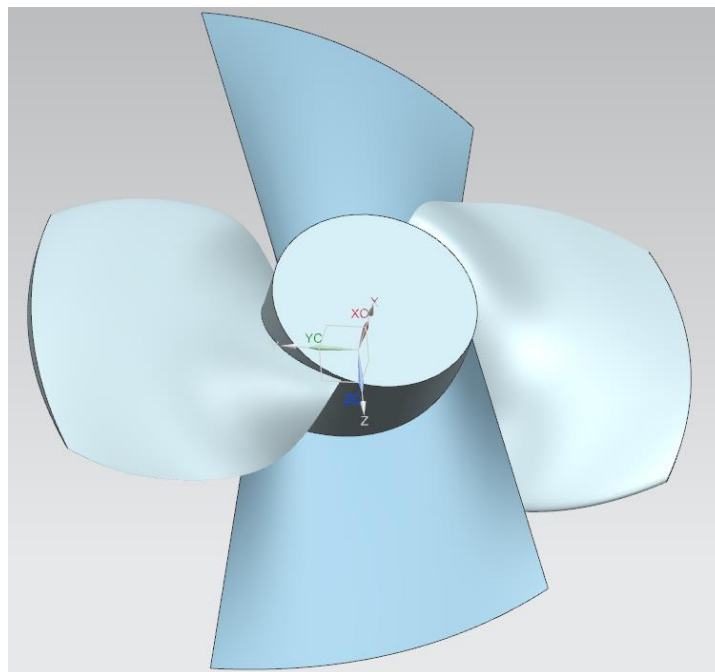


Figura 61. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El siguiente paso es generar el volumen de fluido circundante a la turbina, para esto se regresa al entorno de modelado siguiendo la ruta “File” / “Modeling” (Figura 62) y se selecciona la herramienta “Extrude”, una vez activa se selecciona una de las caras verticales del eje central, ya sea la superior o inferior (Figura 63) e inmediatamente el programa abrirá el entorno de dibujo, acá se dibujan dos circunferencias una de ellas será del tamaño del diámetro del eje central y la otra del diámetro total de la turbina, sobre las cuales se dejará una pequeña abertura (Figura 64), y luego se da clic en la opción “Finish” para dar por terminada la extrusión, posteriormente se definen los límites de la operación, estableciendo que para la opción “End” se utiliza “Until Extended”, y el límite que se elegirá será la cara paralela a la cara sobre la cual se realizó la plantilla de dibujo (Figura 65), terminando con clic “OK”.

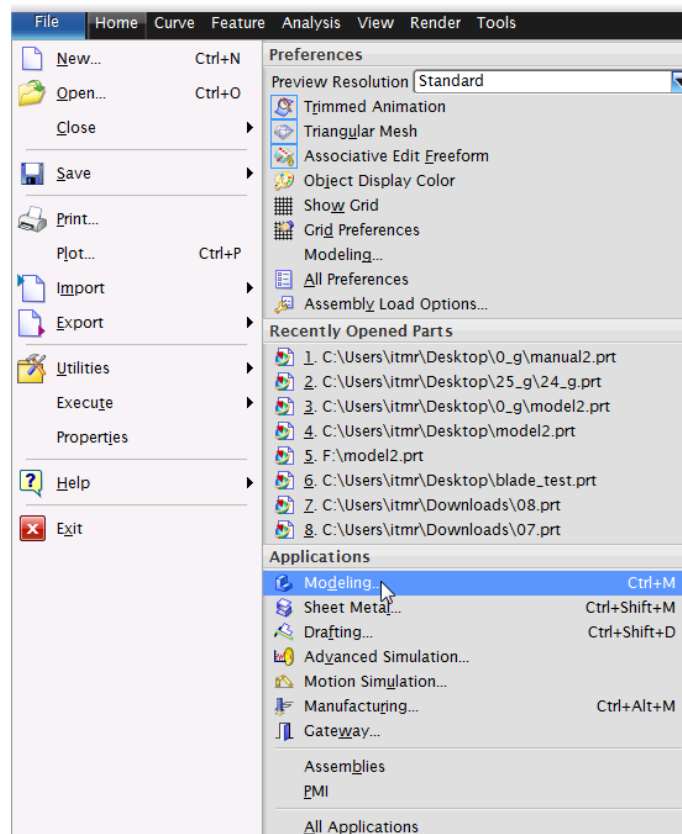


Figura 62. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

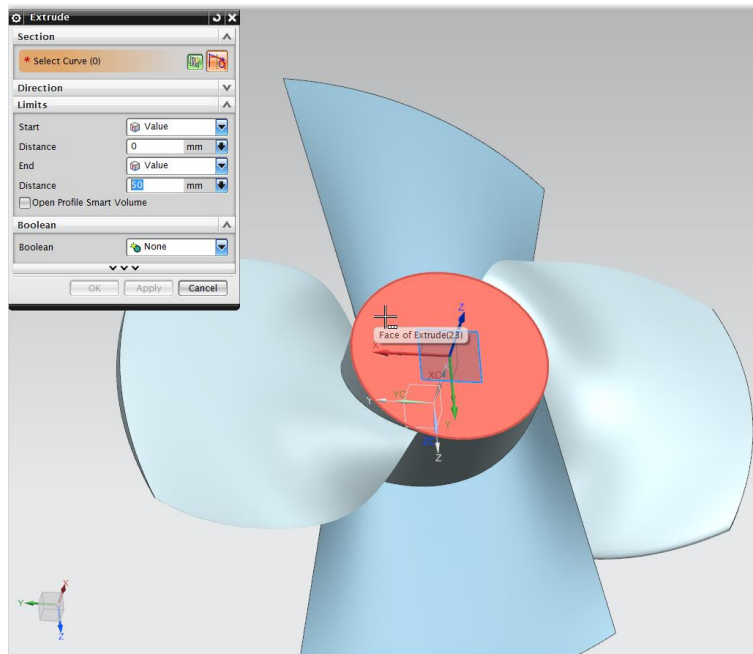


Figura 63. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

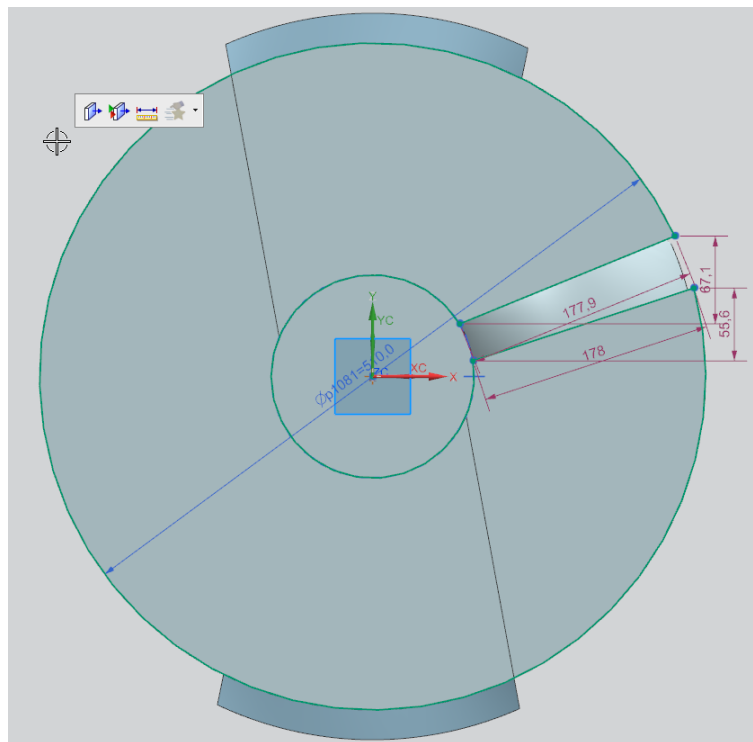


Figura 64. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

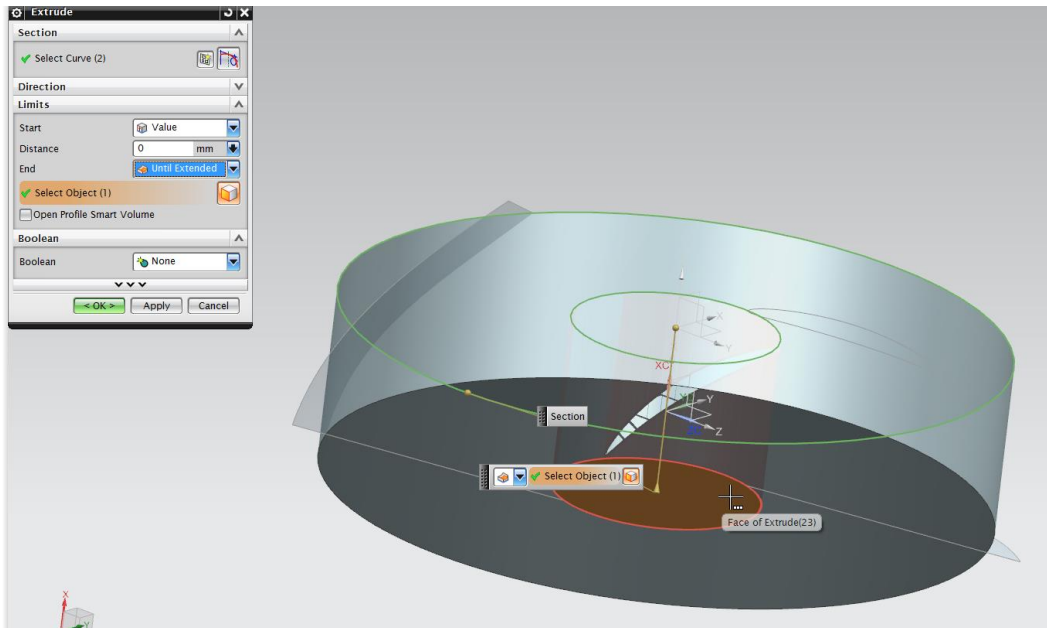


Figura 65. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

Para realizar el corte se usa la herramienta “Trim Body” (Figura 66), una vez activa se selecciona como “Target” el volumen de fluido creado y como “Tool Option” una de las superficies de corte, para terminar se da clic en “Ok” y se repite el mismo procedimiento para la otra superficie de corte (Figura 67), para finalizar se utiliza la herramienta “Subtract” (Figura 68) para extraer la turbina del volumen de fluido circundante y así crear un negativo de la turbina sobre éste último, en “Target” se selecciona el fluido circundante y en “Tool” la turbina (Figura 69), para finalizar se da clic en “Ok”.

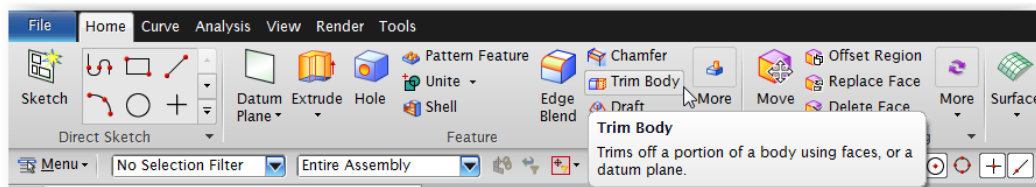


Figura 66. Empleo de la herramienta Trim Body en el entorno Modeling del software NX9.0®.

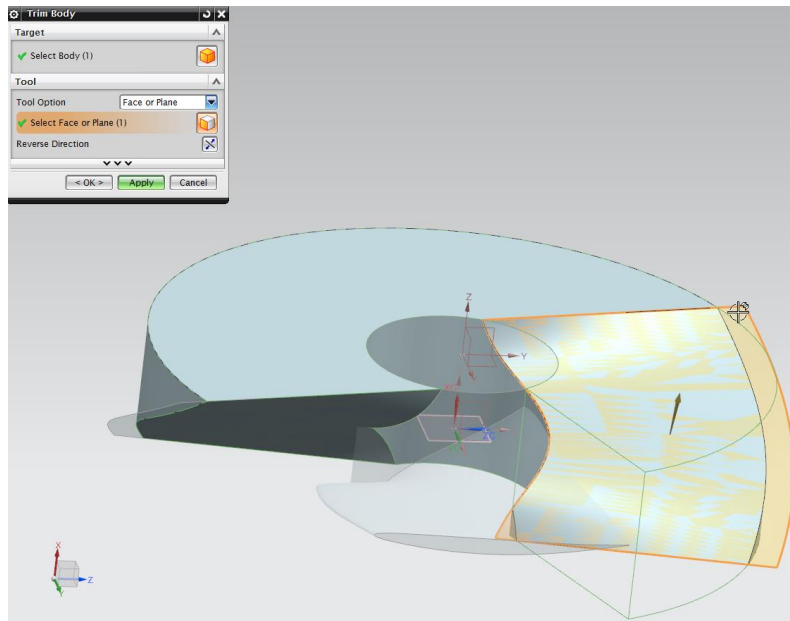


Figura 67. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

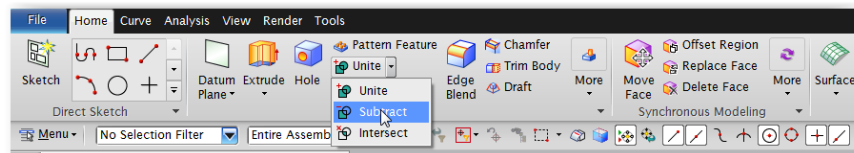


Figura 68. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

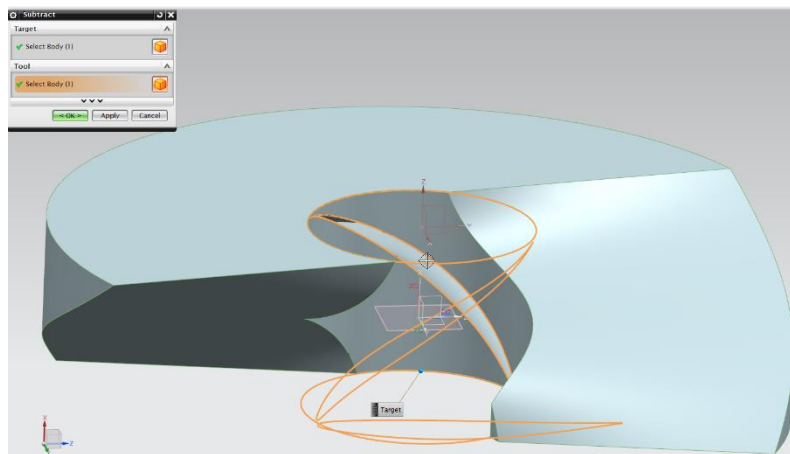


Figura 69. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El paso final es extender el volumen de fluido generando así un recorrido para la entrada y salida del fluido, para esto se selecciona la herramienta Extrusión (Extrude), y como plano de operación la cara superior o inferior del volumen (*Figura 70*), esto activa el entorno de diseño, con la herramienta Proyectar curva (Project Curve) (*Figura 71*) se proyectan los bordes de la geometría (*Figura 72*), se da clic en Terminar (Finish) para terminar el dibujo, para finalizar se da una extensión al volumen y se da clic en Ok (*Figura 73*), se repite el mismo proceso para el otro extremo de la geometría (*Figura 74*), para finalizar se utiliza la herramienta Unir (Unite) para combinar todos los cuerpos en un solo volumen (*Figura 75*), finalmente solo queda exportar el archivo con formato .IGES siguiendo la ruta Archivo/Exportar/IGES (File/Export/IGES) (*Figura 76*) para ser llevado a Ansys 16.0® donde será sometido a un análisis hidrodinámico.

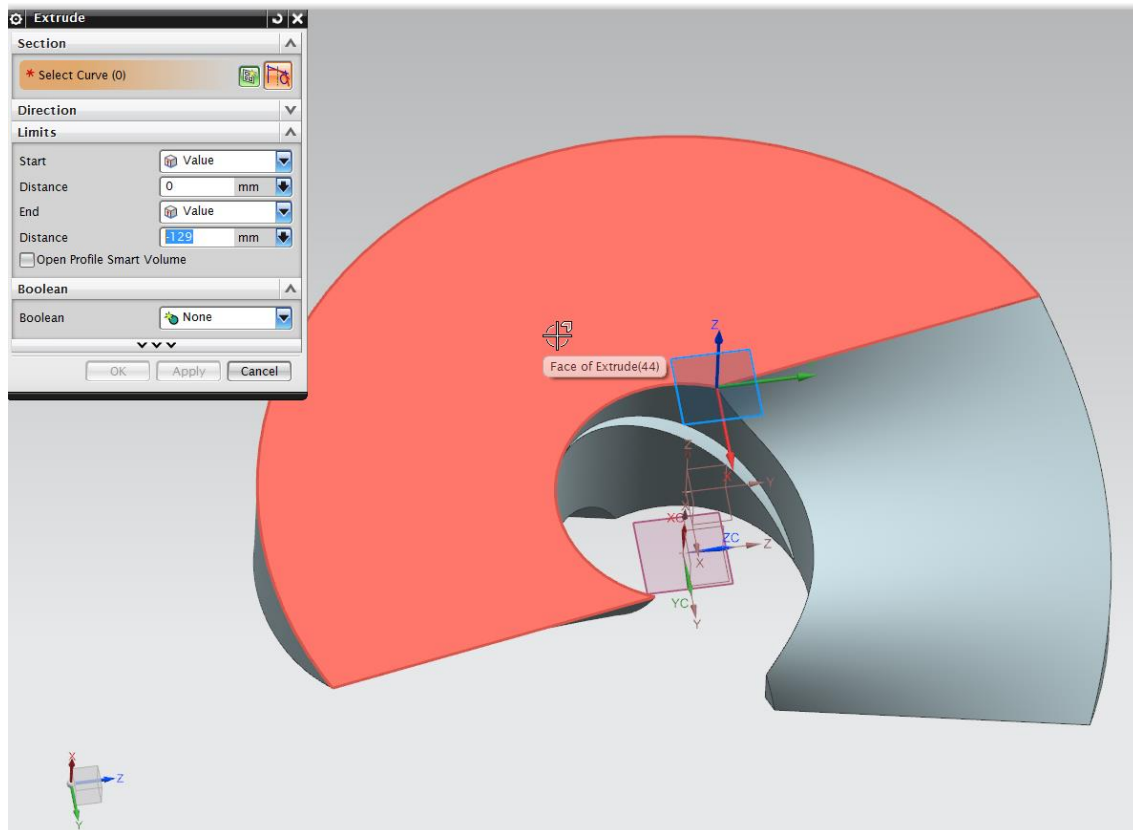


Figura 70. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

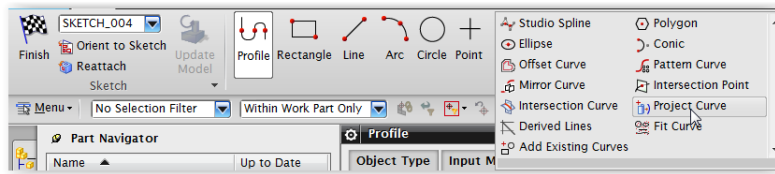


Figura 71. Empleo de la herramienta *Proyectar Curva (Project Curve)* en el entorno *Modeling del software NX9.0®*.

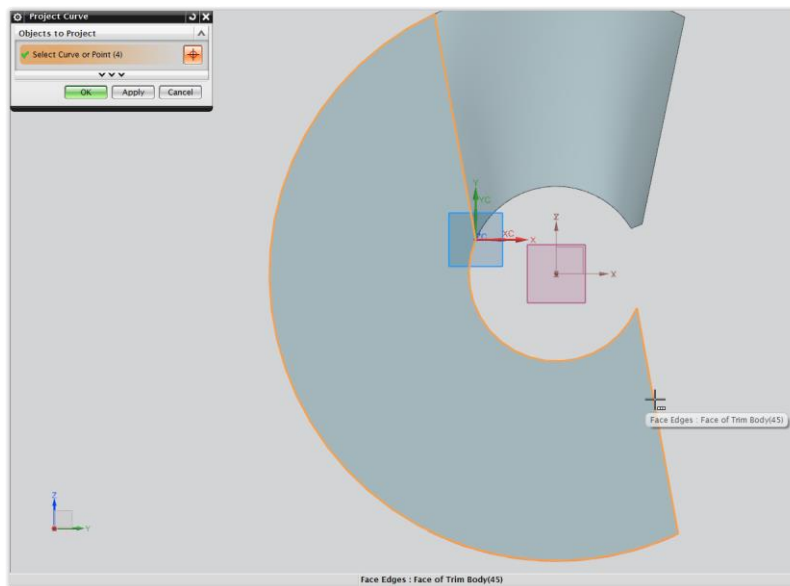


Figura 72. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software *NX9.0®*.

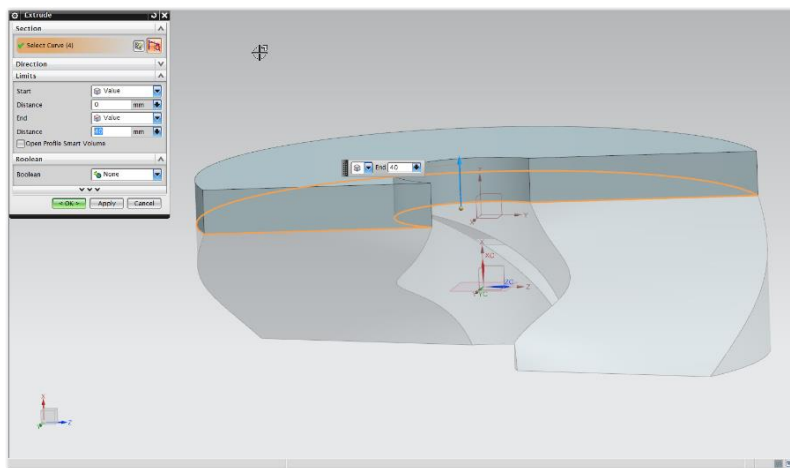


Figura 73. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software *NX9.0®*.

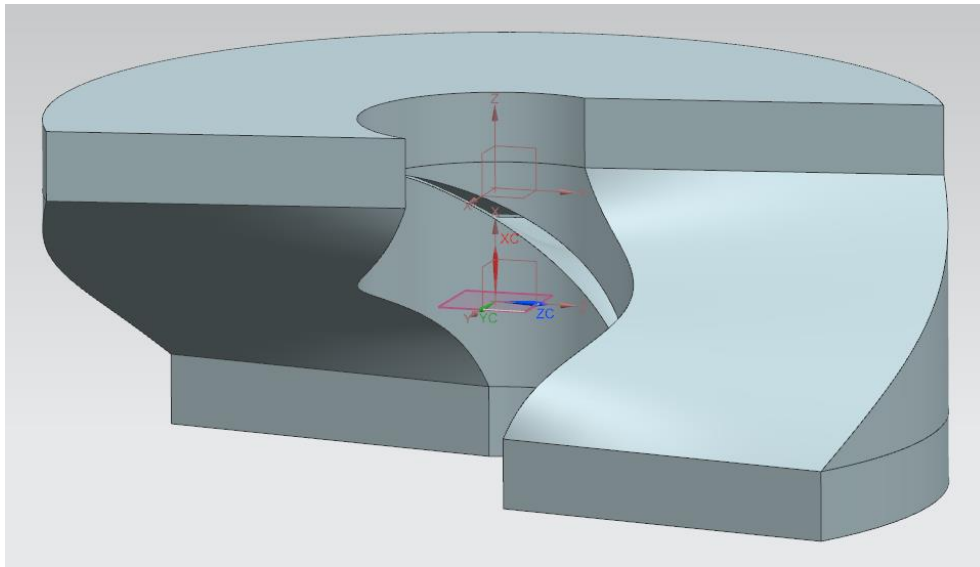


Figura 74. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

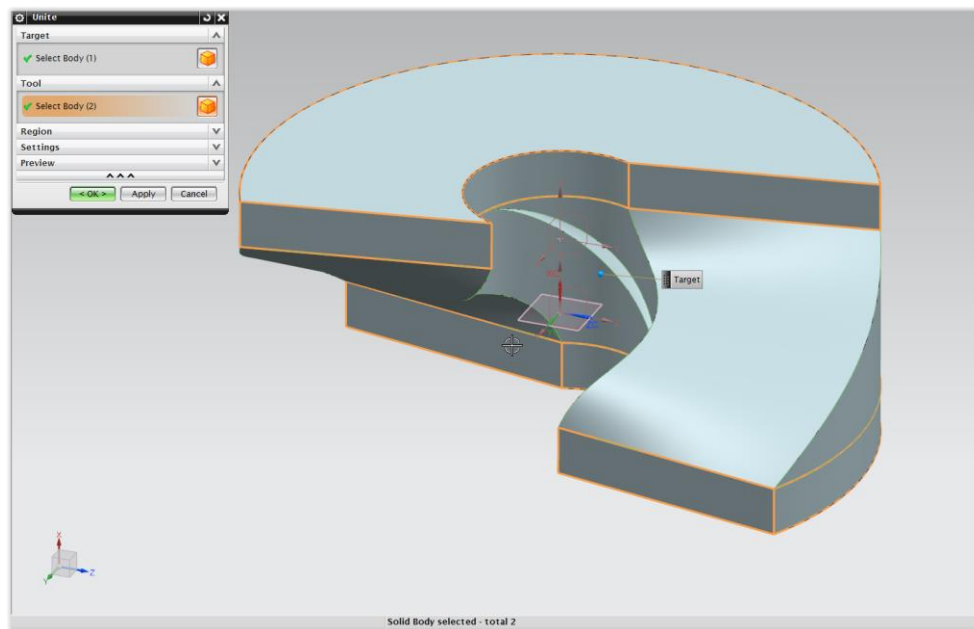


Figura 75. Proceso de generación del fluido circundante de la turbina Kaplan a nivel simétrico en el software NX9.0®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

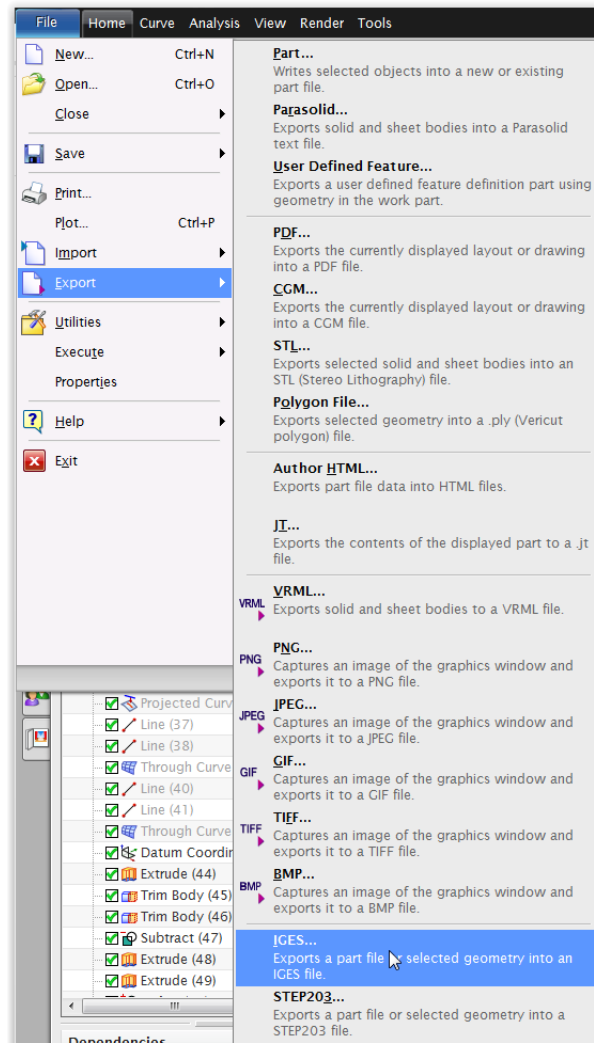


Figura 76. Exportación a .IGES para ser llevado al software Ansys16.0®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.2. Capítulo II: Generación del mallado del fluido en Ansys16.0®

Una vez se cuenta con la geometría, se procede a llevar la misma al programa Ansys16.0®, en la *Figura 77* se observa el entorno principal de la aplicación, allí se seleccionan los diferentes módulos a usar dependiendo del tipo de aplicación necesaria.

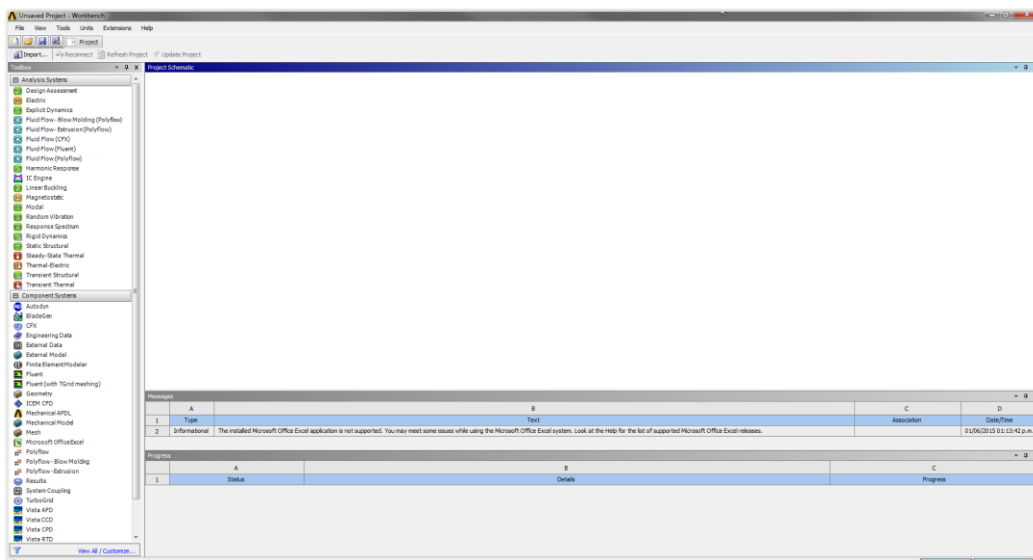


Figura 77. Entorno principal del software Ansys16.0® (Workbench 16.0).

Para comenzar el proceso se selecciona el módulo de geometría (Geometry) como se observa en la *Figura 78*, este es el entorno principal para la generación de geometrías.

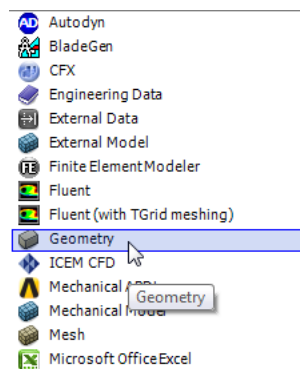


Figura 78. Módulo de generación de geometrías (Geometry) de Ansys 16.0®.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Paso siguiente, con clic sostenido, se arrastra el módulo seleccionado hasta el entorno de trabajo de la aplicación, al finalizar se observará algo similar a la *Figura 79*.

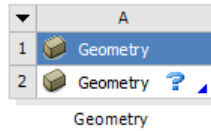


Figura 79. Módulo de generación de geometrías (Geometry) de Ansys 16.0®.

El paso siguiente es importar el archivo que contiene la geometría deseada, para esto, se da clic derecho sobre el módulo creado en paso anterior y se sigue la ruta de Importa geometría/Buscar (Import Geometry/Browse) como se observa en la *Figura 80*.

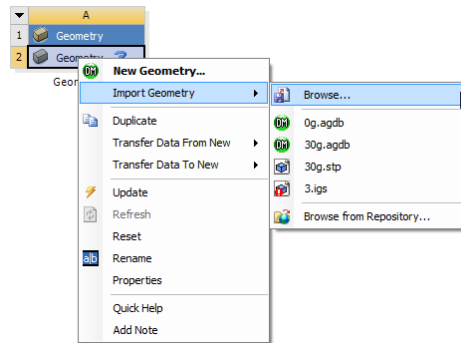


Figura 80. Forma de importar una geometría en el módulo Geometry de Ansys 16.0®.

Al dar clic en buscar, el programa abrirá una ventana en el explorador del sistema, para ubicar el archivo, una vez hecho se selecciona y se le da clic en ok para finalizar la operación (*Figura 81*).

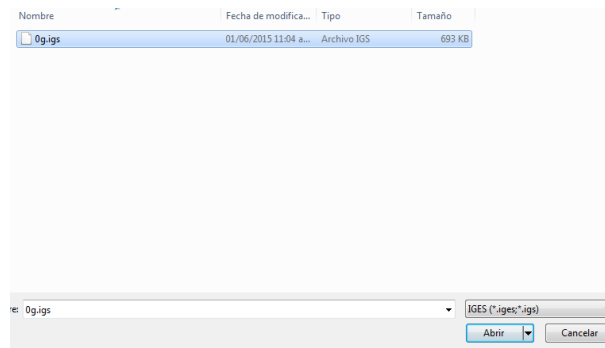


Figura 81. Proceso de importación de un modelo generado previamente con formato .IGES en el software Ansys 16.0®.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El siguiente paso, es entrar en el entorno de diseño para generar los cuerpos importados en el programa, para hacerlo se da nuevamente clic derecho sobre el módulo de geometría, y se selecciona Editar Geometría (Edit Geometry) como se observa en la *Figura 82*.

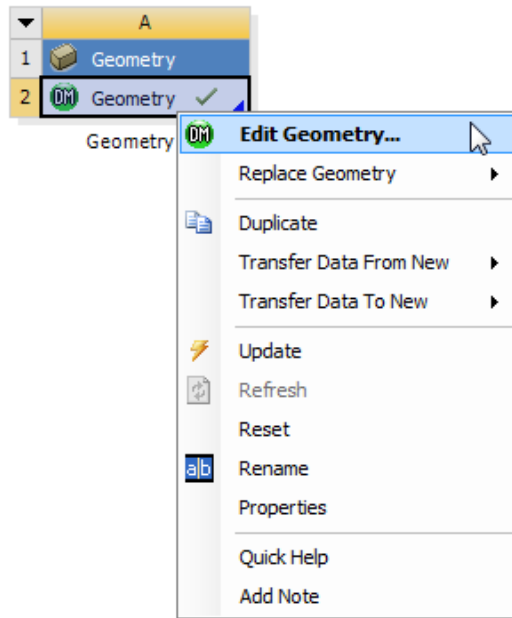


Figura 82. Forma de abrir el módulo de generación de geometrías de Ansys 16.0®.

Hecho esto se encuentra dentro del entorno de diseño del programa, en la vista de detalles (Details View) se debe seleccionar como operación Cuerpo Congelado (Frozen Body) y verificar que la opción de cuerpos sólidos (Solid Bodies) esté verificada, para finalizar se da clic en la opción Generar (Generate) ubicada en la parte superior de la ventana (*Figura 83*), finalizado el proceso se cuenta como producto final con el volumen de fluido circundante de la turbina (*Figura 84*).

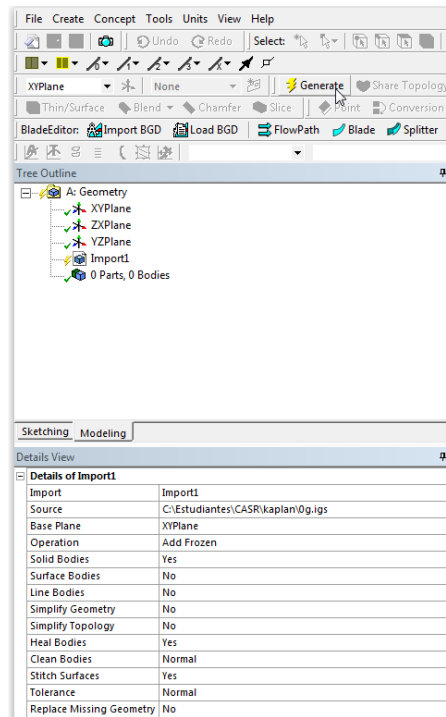


Figura 83. Generación de la geometría importada en Ansys16.0®.

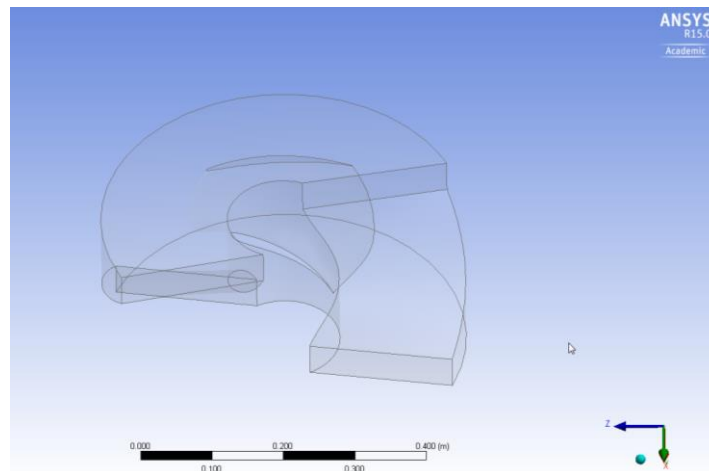


Figura 84. Modelo del fluido circundante de un álabe de la turbina Kaplan en el módulo de geometrías (Geometry) de Ansys 16.0®.

Finalmente se debe verificar en las propiedades del archivo, que el volumen generado se encuentre como fluido, para esto, en el explorador de operaciones (Tree Outline) se selecciona el cuerpo, y bajo la vista de detalles (Details View) en la opción Fluido/Sólido (Fluid/Solid) se selecciona Fluid, como se observa en la Figura 85.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

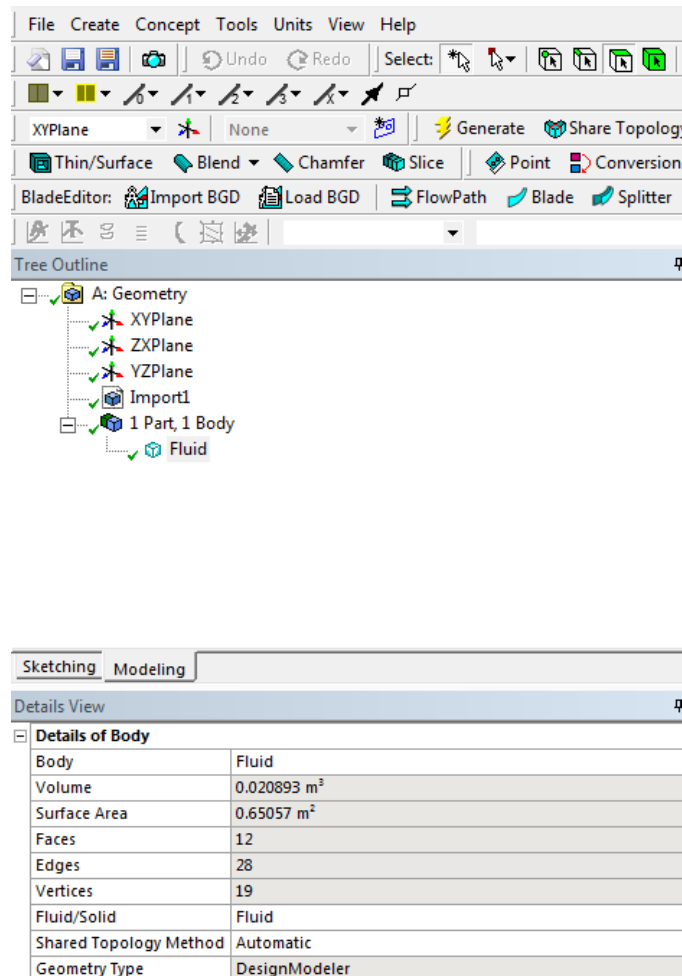


Figura 85. Selección del tipo de modelo que se tiene (Fluido o Sólido) en Ansys 16.0®.

Para finalizar se cierra el entorno de diseño. hecho esto, se regresa al entorno principal del programa se procede a llevar el volumen creado al entorno de mallado, par esto se selecciona el módulo de Mallado (Mesh) como se aprecia en la *Figura 86*, y con clic sostenido se lleva hasta el entorno de trabajo (*Figura 87*), el paso siguiente es conectar los dos módulos, para esto con clic sostenido se selecciona el recuadro de Geometría (Geometry) y se lleva hasta el recuadro de mallado (Mesh) como se observa en la *Figura 88*, al finalizar se debe observar algo similar a lo mostrado en la *Figura 89*.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

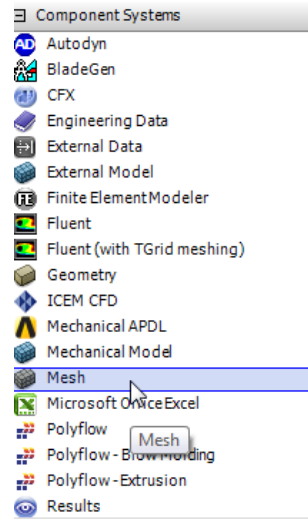


Figura 86. Módulo de mallado (Mesh) del software Ansys 16.0®.

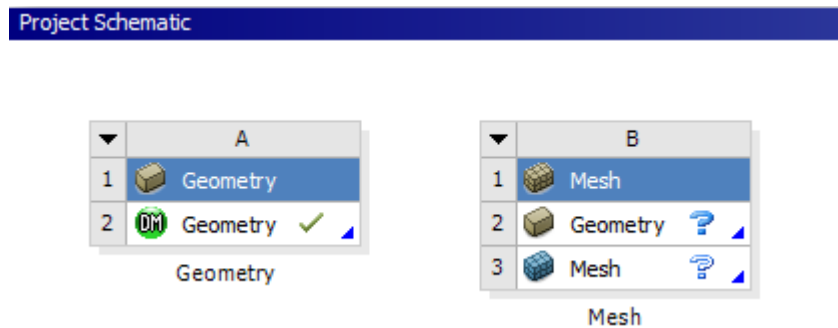


Figura 87. Ubicación del módulo de mallado (Mesh) en la ventana del esquema del proyecto (Project Schematic) de Ansys 16.0®.

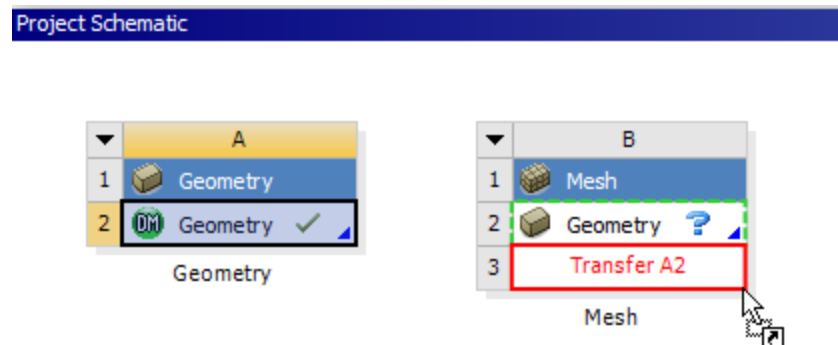


Figura 88. Conexión entre el módulo de geometrías (Geometry) y el módulo de mallado (Mesh) en Ansys 16.0®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Project Schematic

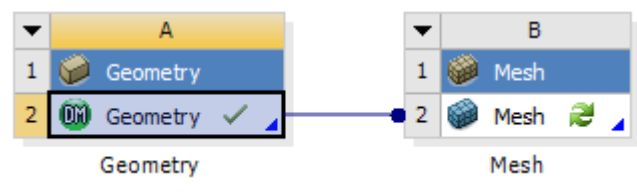


Figura 89. Conexión completa entre el módulo de geometrías (Geometry) y el módulo de mallado (Mesh) en Ansys 16.0®.

Una vez conectados los módulos se debe abrir el entorno de mallado para realizar la discretización del volumen; para esto se da clic derecho sobre el módulo de Malla (Mesh) y se selecciona la opción Editar (Edit) (Figura 90), luego de lo cual, el programa comenzará a cargar la información del modelo y generar una vista preliminar (Figura 91).

Project Schematic

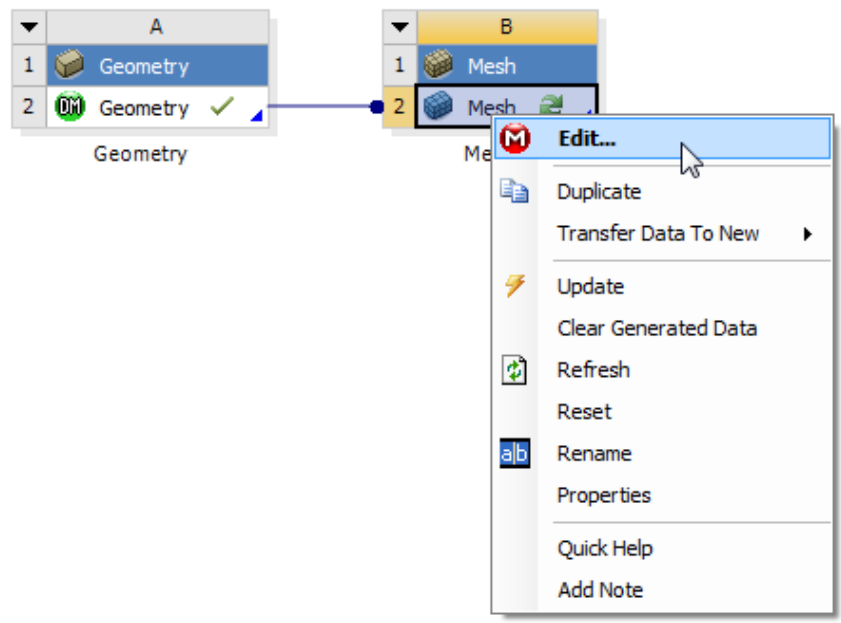


Figura 90. Forma de abrir el módulo de mallado (Mesh) de Ansys 16.0®.

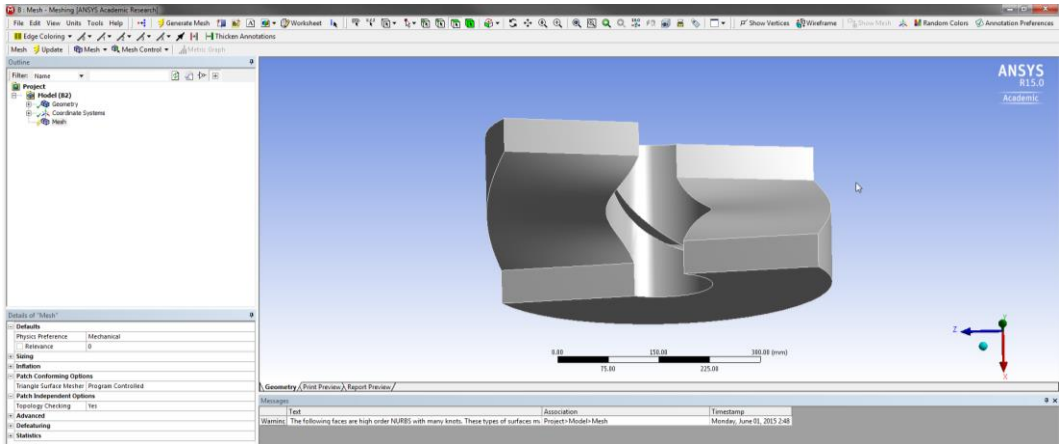


Figura 91. Vista preliminar del modelo en el módulo de mallado (Mesh) de Ansys 16.0®.

Lo primero que se hace antes de realizar la configuración del mallado es nombrar las condiciones de frontera que regirán el modelo; para esto, se selecciona inicialmente la zona superior del fluido, hacia donde se encuentra el ángulo de ataque del álabe de la turbina Kaplan, la cual será la entrada del modelo, y posteriormente se da clic derecho en cualquier parte de la ventana, lo cual abre un cuadro de opciones en el que se da clic en la opción “Create Named Selection” (Figura 92), abriendo un nuevo cuadro que permite escribir el nombre de la frontera (de libre elección), en este caso se nombró como “Inlet” (Figura 93).

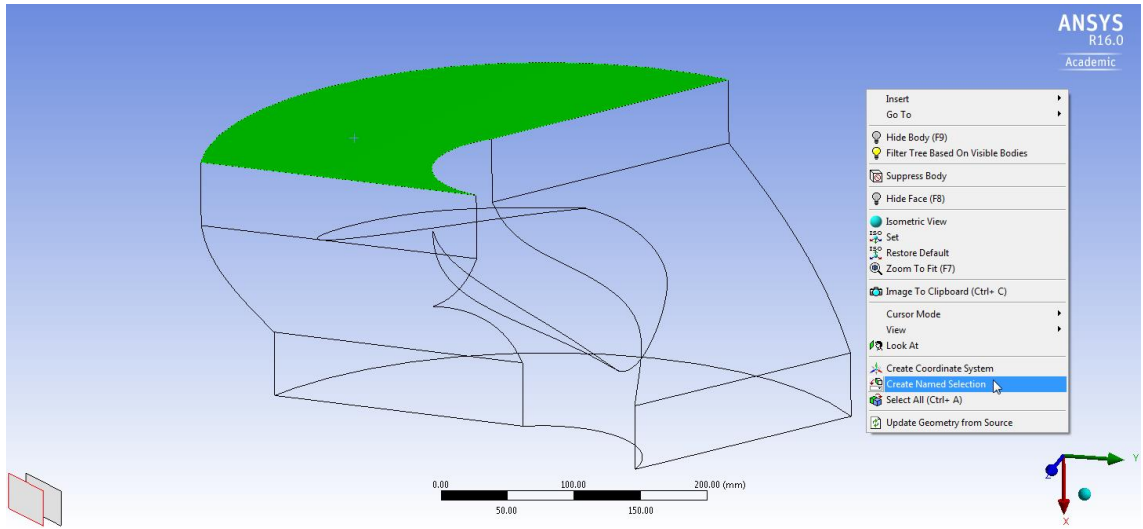


Figura 92. Selección de la frontera que será la entrada del modelo en Ansys 16.0®.

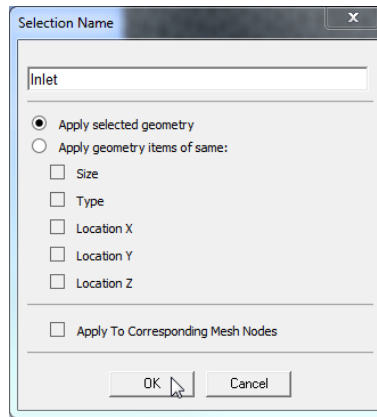


Figura 93. Nombrado de la entrada (“Inlet”) del modelo en Ansys 16.0®.

Posteriormente, se selecciona la zona inferior del fluido, hacia el lado opuesto donde se encuentra el ángulo de ataque del álabe de la turbina Kaplan, la cual será la salida del modelo (Figura 94), y luego se realiza el procedimiento presentado anteriormente para nombrar esta frontera (nombre de libre elección), que para este caso se denominó como “Outlet” (Figura 95).

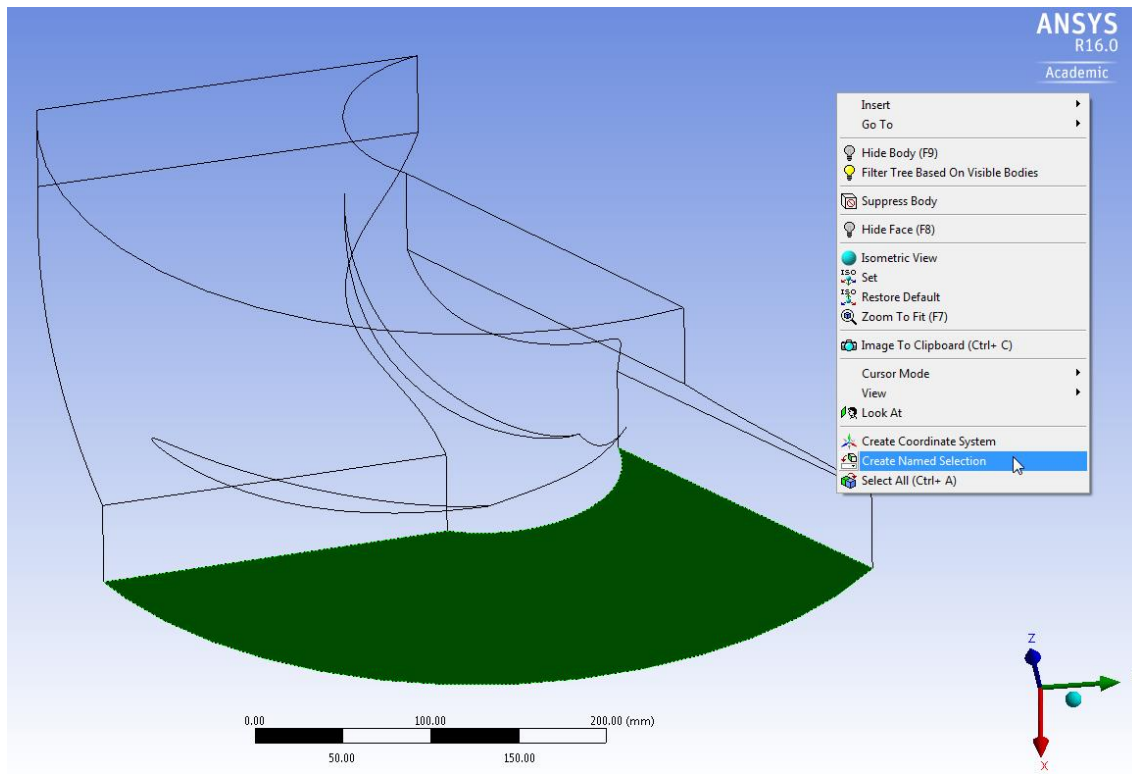


Figura 94. Selección de la frontera que será la entrada del modelo en Ansys 16.0®.

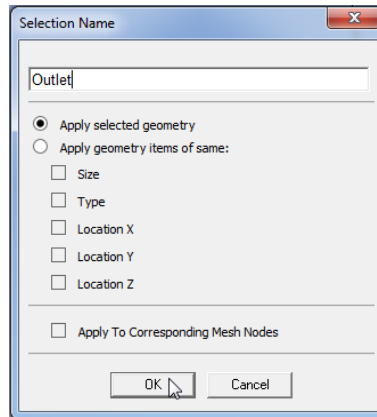


Figura 95. Nombrado de la salida (“Outlet”) del modelo en Ansys 16.0®.

Luego, se selecciona la zona interior del modelo que representa el eje de la turbina Kaplan (Figura 96) y se realiza el procedimiento anterior para nombrar esta frontera (nombre de libre elección), que para este caso se nombró como “Hub” (Figura 97).

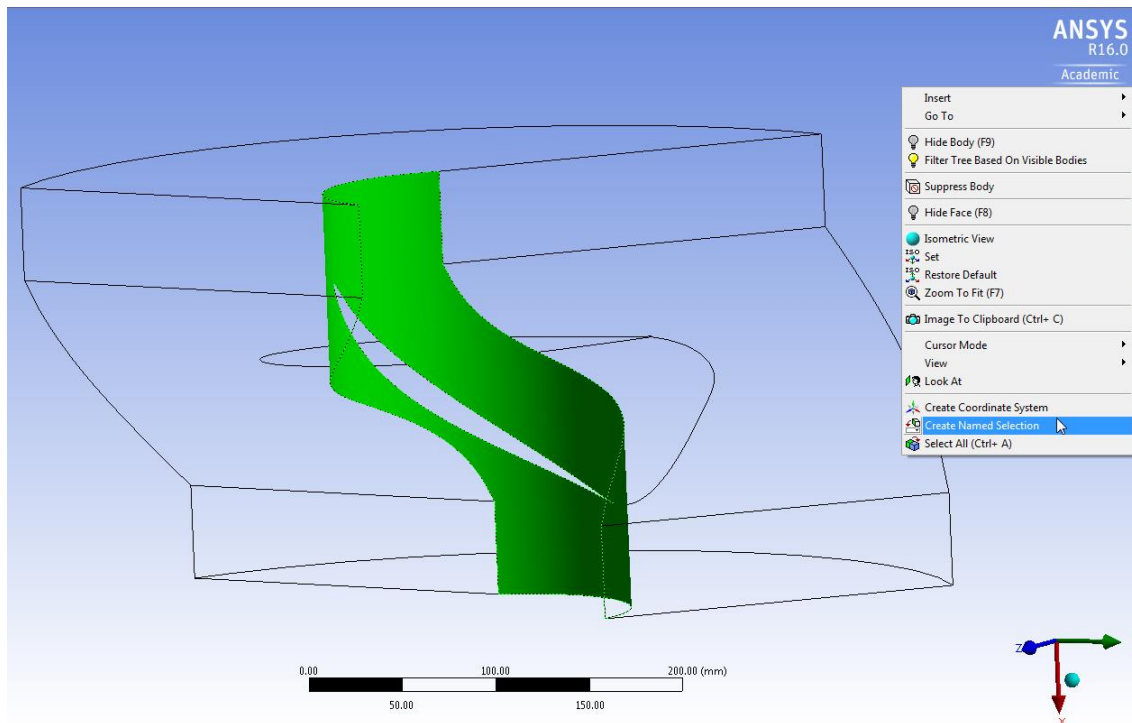


Figura 96. Selección de la frontera que será el eje de la turbina Kaplan en Ansys 16.0®.

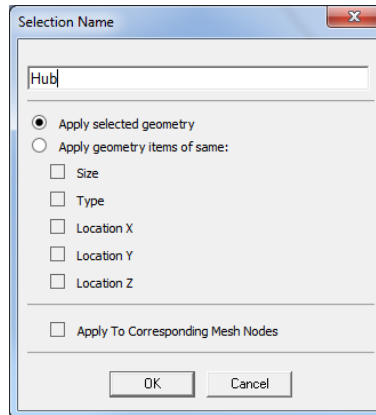


Figura 97. Nombrado del eje (“Hub”) de la turbina Kaplan en Ansys 16.0®.

Continuando con el proceso de nombrado, se selecciona la zona exterior del modelo (Figura 98) y se realiza el procedimiento presentado anteriormente para nombrar esta frontera (nombre de libre elección), que para este caso se llamó como “Shroud” (Figura 99).

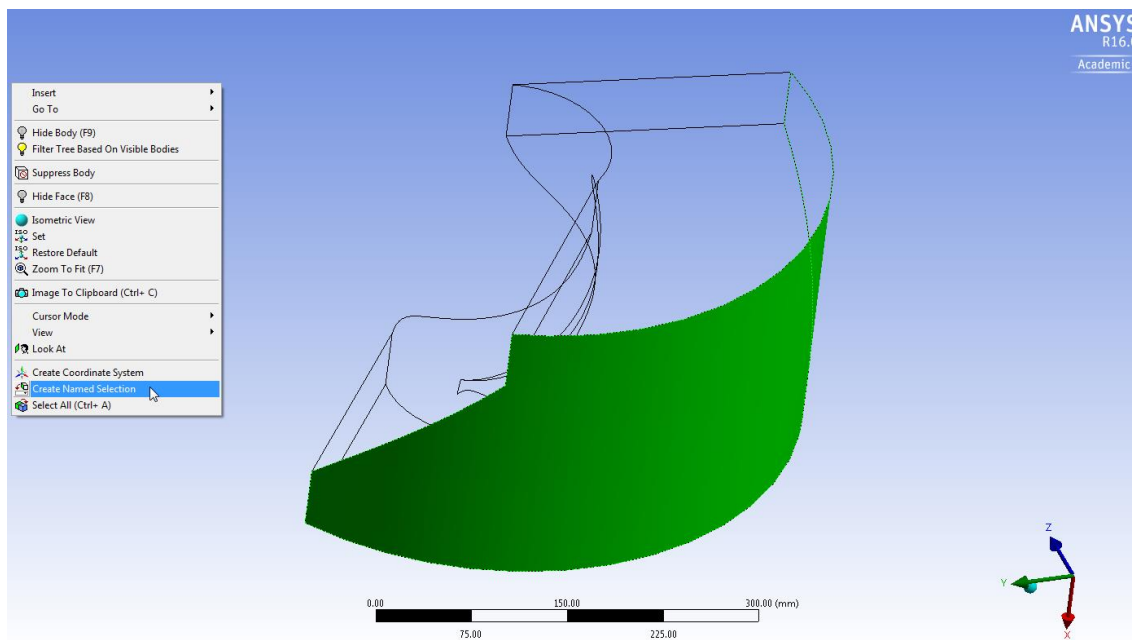


Figura 98. Selección de la frontera exterior de la turbina Kaplan en Ansys 16.0®.

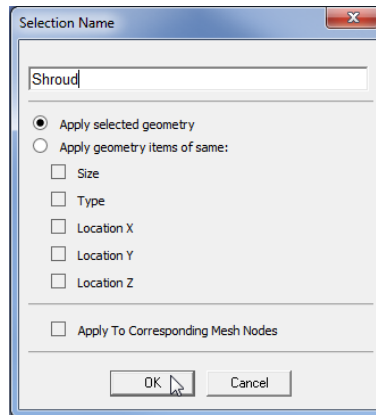


Figura 99. Nombrado de la zona exterior (“Shroud”) del modelo en Ansys 16.0®.

Posteriormente, se selecciona la zona interna del modelo, la cual representa el álabe de la turbina Kaplan (Figura 100) y se realiza el mismo procedimiento de nombrado, que en este caso se nombró como “Blade” (Figura 101).

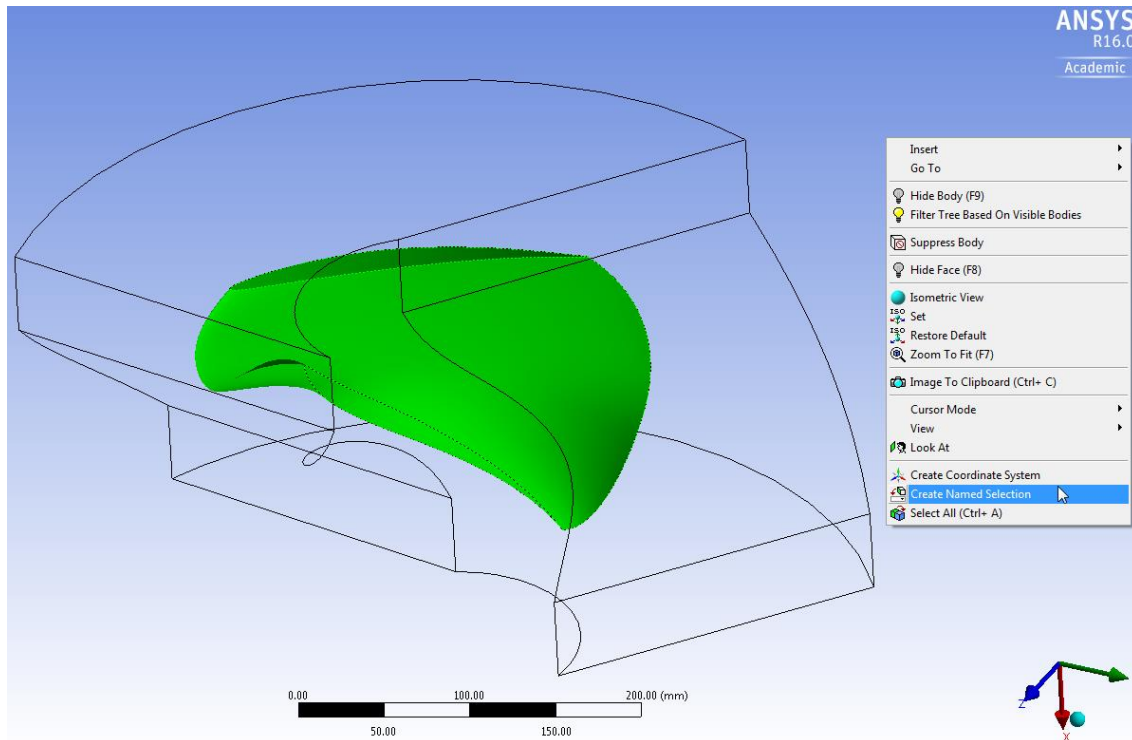


Figura 100. Selección del álabe de la turbina Kaplan en Ansys 16.0®.

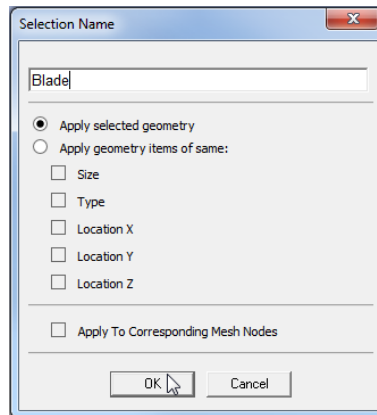


Figura 101. Nombrado del álabe (“Blade”) de la turbina Kaplan en Ansys 16.0®.

A continuación, se selecciona la zona inferior derecha del modelo, la cual representa una interface simétrico rotativa de éste (Figura 102) y se realiza nuevamente el procedimiento de nombrado, que en este caso se definió como “P1a” (Figura 103).

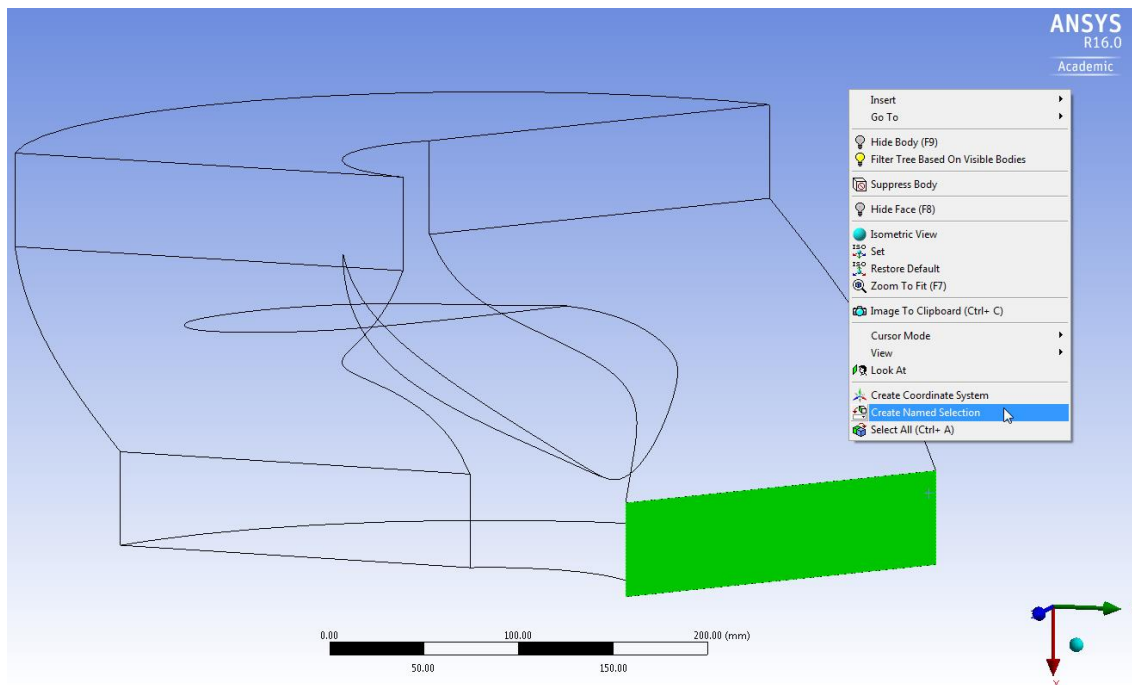


Figura 102. Selección de la interface simétrico rotativa inferior derecha del modelo en Ansys 16.0®.

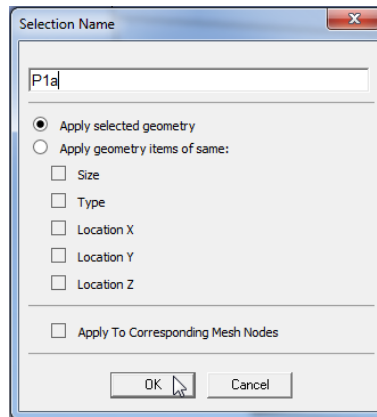


Figura 103. Nombrado de la interface simétrico rotativa inferior derecha (“P1a”) del modelo en Ansys 16.0®.

Luego, se selecciona la zona inferior izquierda del modelo, la cual representa la interface simétrico rotativa de éste (*Figura 104*) (que se conectará con la interface anterior “P1a” más adelante) y se realiza nuevamente el procedimiento de nombrado, que en este caso se nombró como “P1b” (*Figura 105*).

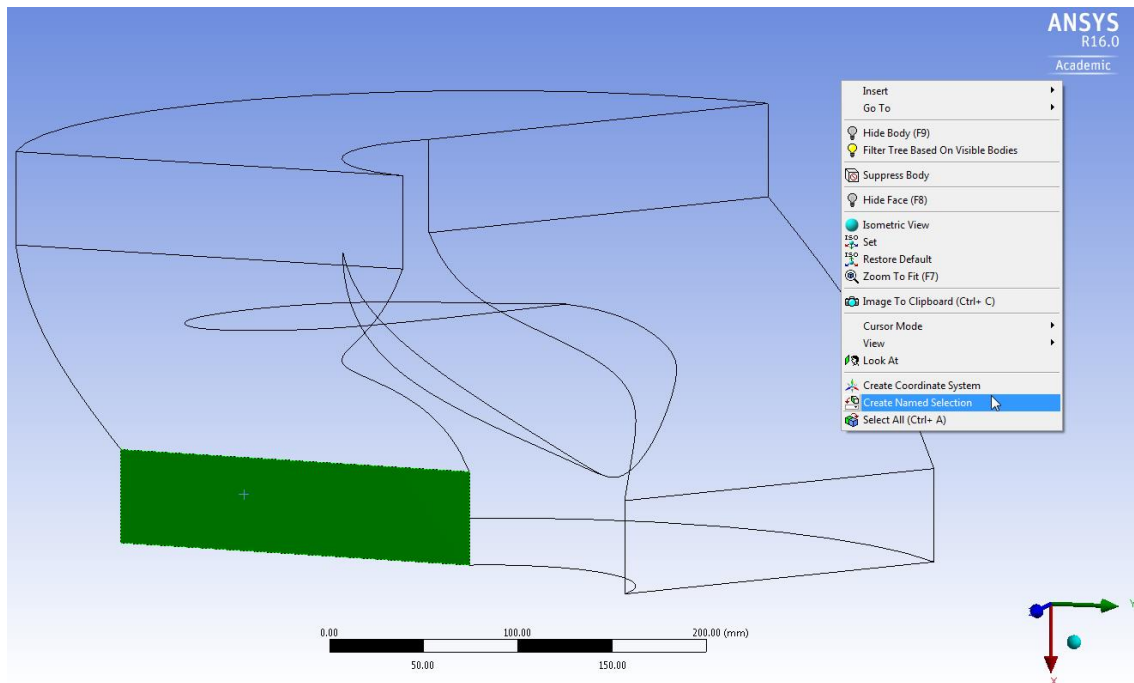


Figura 104. Selección de la interface simétrico rotativa inferior izquierda del modelo en Ansys 16.0®.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

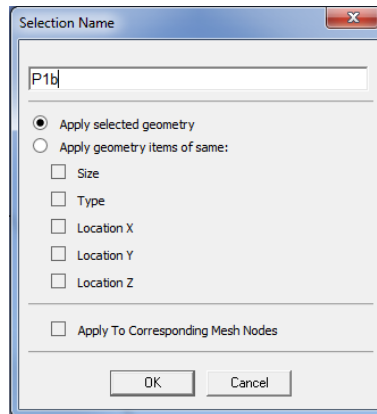


Figura 105. Nombrado de la interface simétrico rotativa inferior izquierda (“P1b”) del modelo en Ansys 16.0®.

Posteriormente, se selecciona la zona media derecha del modelo, la cual representa otra interface simétrico rotativa de éste (Figura 106), realizando de nuevo el procedimiento de nombrado, que en este caso se definió como “P2a” (Figura 107).

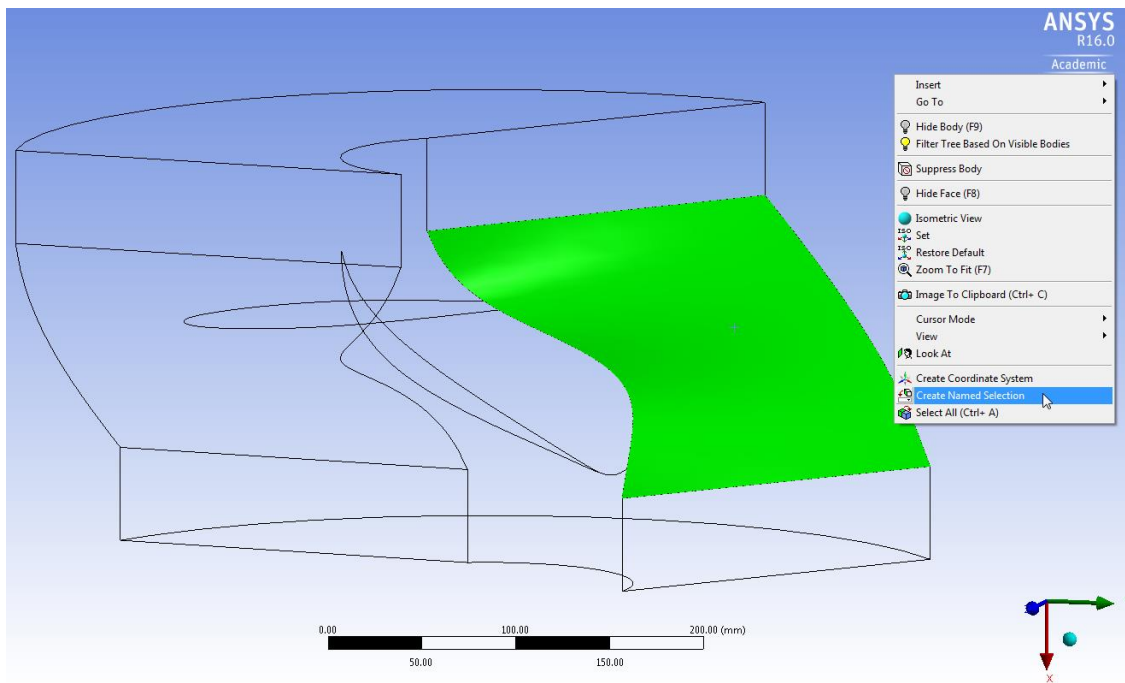


Figura 106. Selección de la interface simétrico rotativa media derecha del modelo en Ansys 16.0®.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

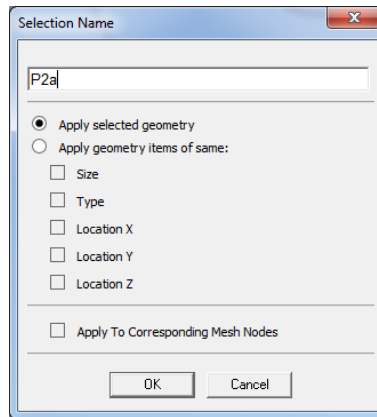


Figura 107. Nombrado de la interface simétrico rotativa media derecha (“P2a”) del modelo en Ansys 16.0®.

Luego, se selecciona la zona media izquierda del modelo, la cual representa otra interface simétrico rotativa de éste (Figura 108) (que se conectará con la interface anterior “P2a” más adelante) y se realiza nuevamente el procedimiento de nombrado, que en este caso se nombró como “P2b” (Figura 109).

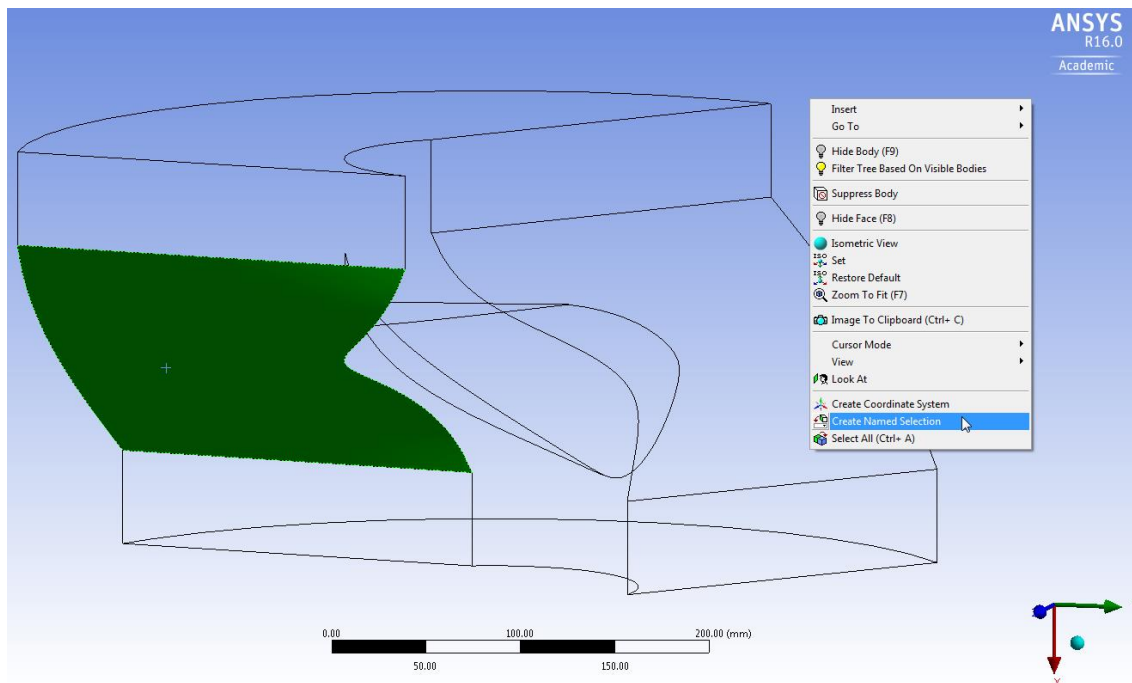


Figura 108. Selección de la interface simétrico rotativa media izquierda del modelo en Ansys 16.0®.

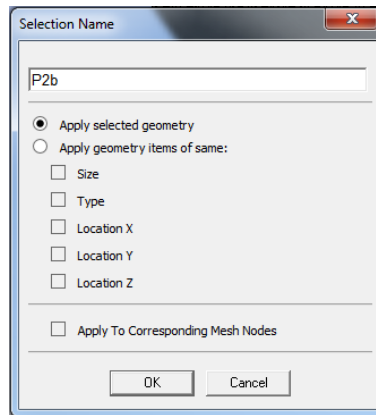


Figura 109. Nombrado de la interface simétrico rotativa media izquierda (“P2b”) del modelo en Ansys 16.0®.

A continuación, se selecciona la zona superior derecha del modelo, la cual representa otra interface simétrico rotativa de éste (Figura 110) y se realiza nuevamente el procedimiento de nombrado, que en este caso se definió como “P3a” (Figura 111).

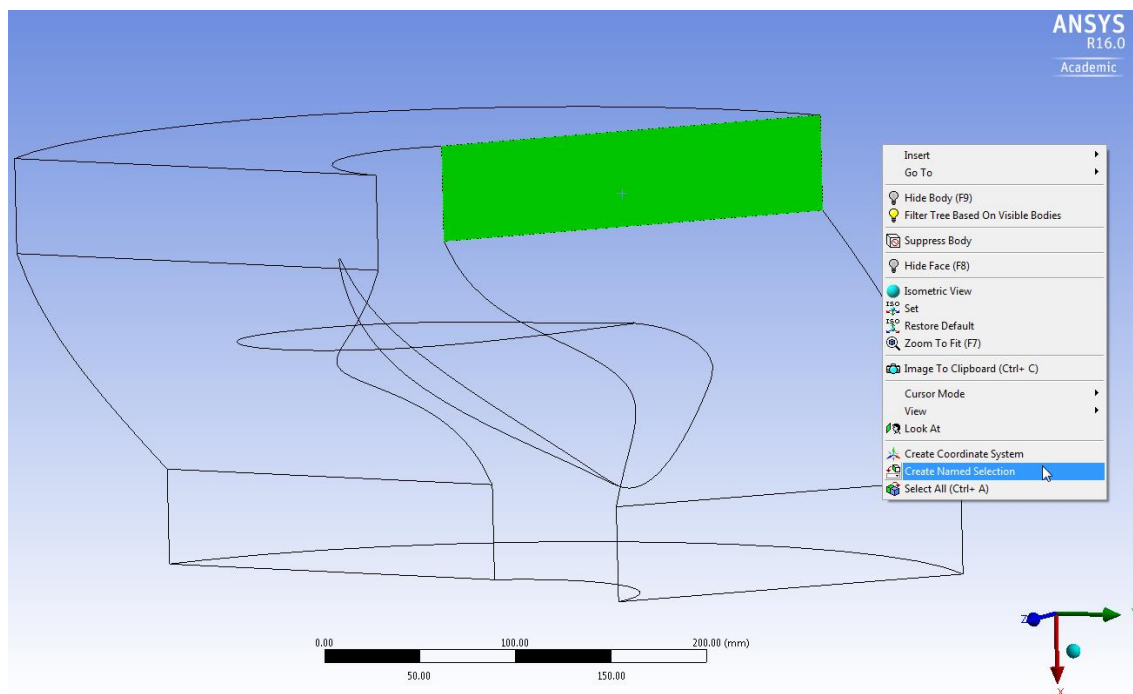


Figura 110. Selección de la interface simétrico rotativa superior derecha del modelo en Ansys 16.0®.

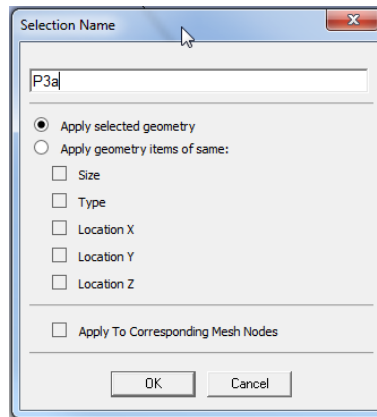


Figura 111. Nombrado de la interface simétrico rotativa superior derecha (“P3a”) del modelo en Ansys 16.0®.

Finalmente, se selecciona la zona superior izquierda del modelo, la cual representa otra interface simétrico rotativa de éste (Figura 112) (que se conectará con la interface anterior “P3a” más adelante) y se realiza nuevamente el procedimiento de nombrado, que en este caso se nombró como “P3b” (Figura 113). En la Figura 114, se muestran los “Named Selection” generados a partir del nombramiento de las fronteras del modelo.

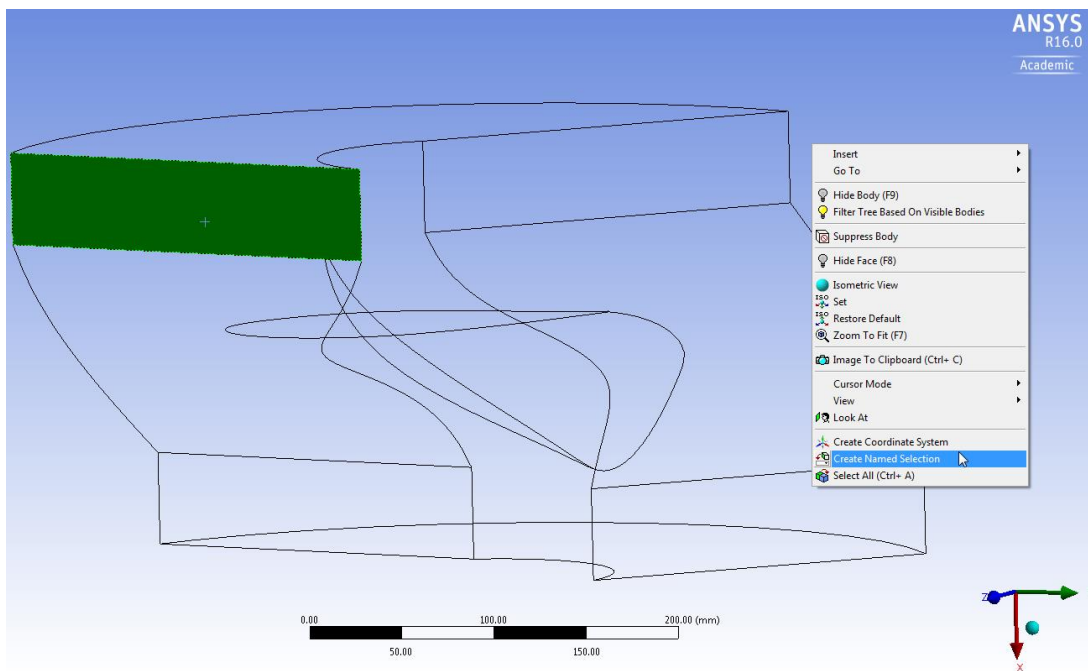


Figura 112. Selección de la interface simétrico rotativa superior izquierda del modelo en Ansys 16.0®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

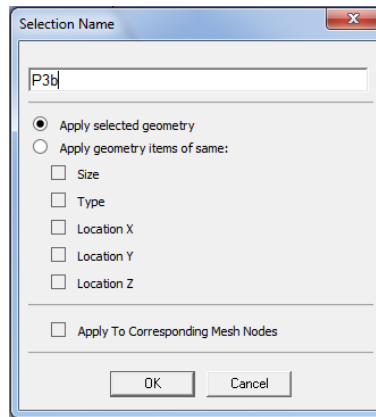


Figura 113. Nombrado de la interface simétrico rotativa superior izquierda (“P3b”) del modelo en Ansys 16.0®.

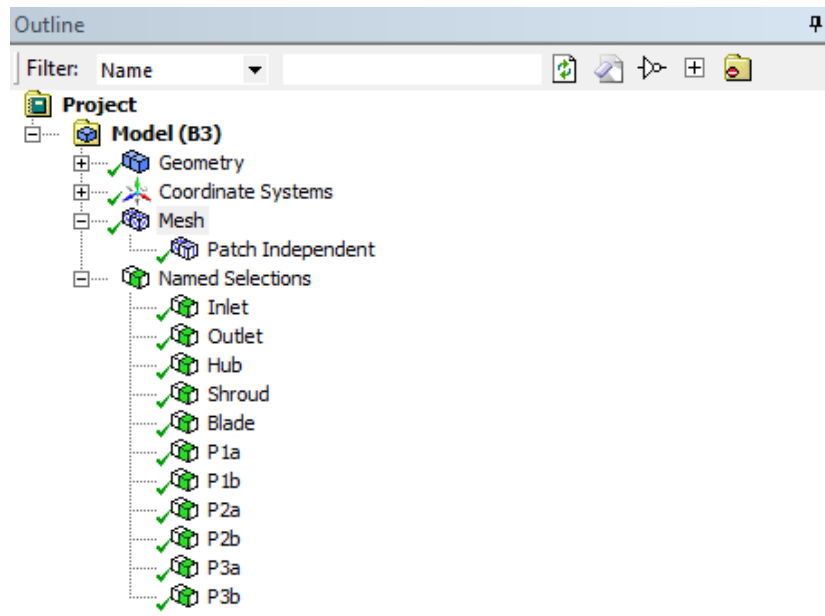


Figura 114. Vista de los “Named Selection” generados de las fronteras del modelo en Ansys 16.0®.

Continuando con el mallado, el primer paso es configurar los parámetros básicos de la malla, seleccionando inicialmente la malla (Mesh) en el Contorno de operaciones (Outline), con lo cual aparecerán en la parte inferior los Detalles de la misma (Details of “Mesh”), en donde se define Preferencia Física (Physics Preference) como CFD, como Preferencia de Solución (Solver Preference) CFX y 100 como valor de Relevancia (Relevance) (Figura 115).

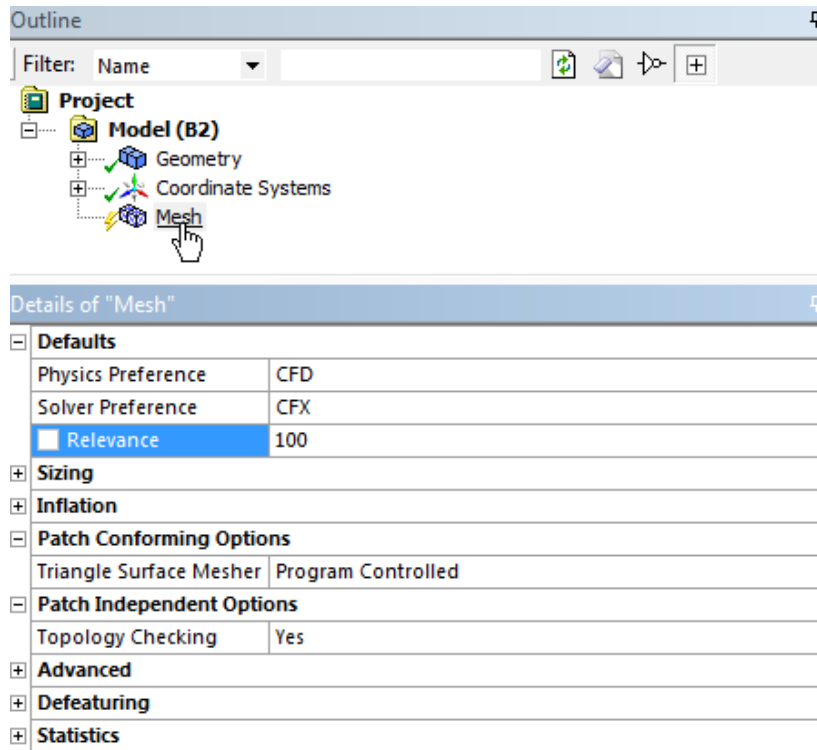


Figura 115. Configuración del mallado para el fluido de la turbina Kaplan en Ansys 16.0®.

El último paso es definir un método de mallado, para esto se da clic derecho sobre el Contorno de operaciones (Outline) y se sigue la ruta Insertar/Método (Insert/Method) como se observa en la Figura 116; bajo Detalles de Método Automático (Details of "Automatic Method") se selecciona la opción de Geometría (Geometry), esto activará el cursor para selección del volumen (Figura 117), para terminar se da clic en Aplicar (Apply), seguidamente sobre la opción se Método (Method) se selecciona Tetraedros (Tetrahedrons) (Figura 118), inmediatamente aparecerá un nuevo parámetro en la parte inferior llamado Algoritmo (Algorithm), bajo esta nueva opción se selecciona Parche Independiente (Patch Independent) (Figura 119) para finalizar se da clic sobre la opción de Generar Malla (Generate Mesh) ubicada en la parte superior (Figura 120), inmediatamente le programa procederá a crear un mallado sobre la geometría siguiendo los parámetros dados, el producto final del proceso se puede observar en la Figura 121.

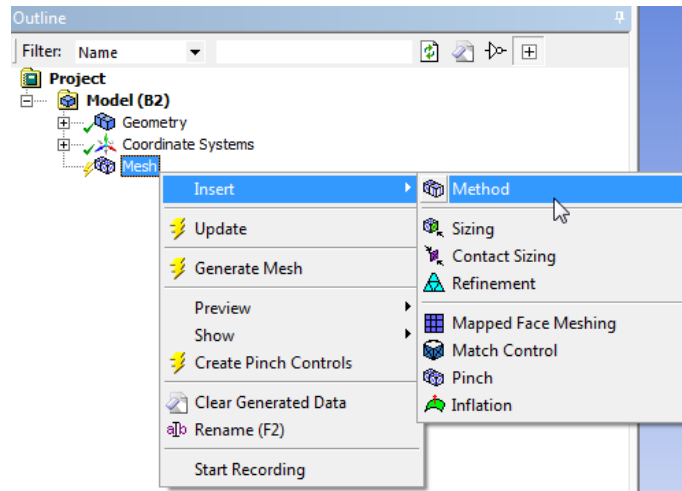


Figura 116. Forma de insertar un método de malla en Ansys 16.0®.

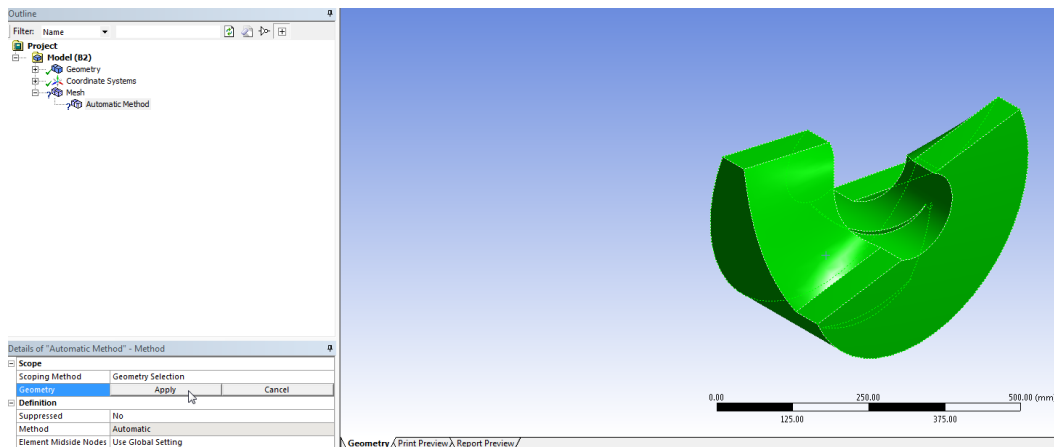


Figura 117. Selección del modelo que será sometido al método de malla en Ansys 16.0®.

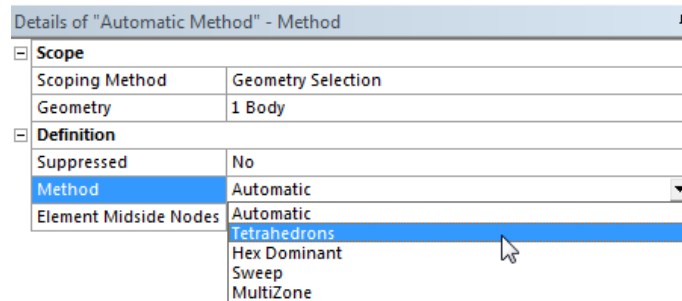


Figura 118. Selección del método de malla que se empleará para el fluido en Ansys 16.0®.

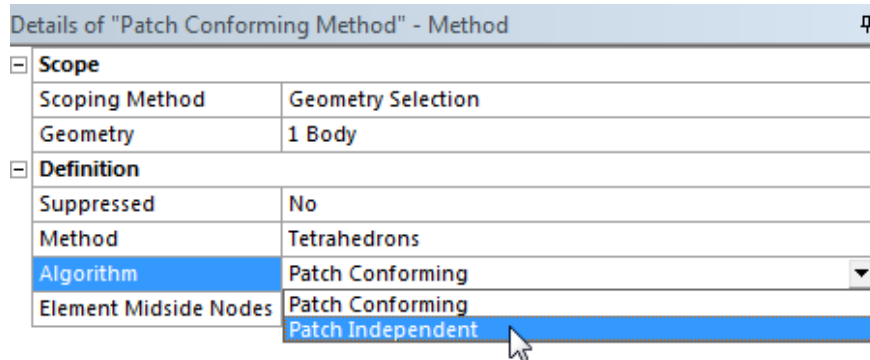


Figura 119. Selección del algoritmo que regirá el método de malla del fluido en Ansys 16.0®.

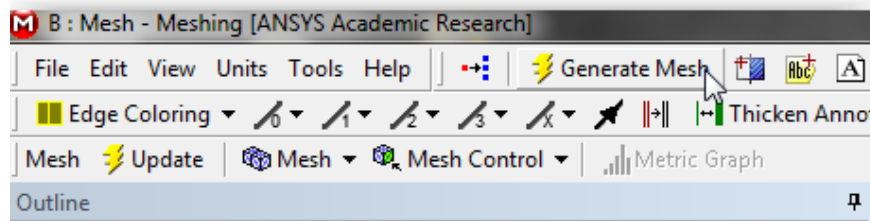


Figura 120. Selección del tipo de modelo que se tiene (Fluido o Sólido) en Ansys 16.0®.

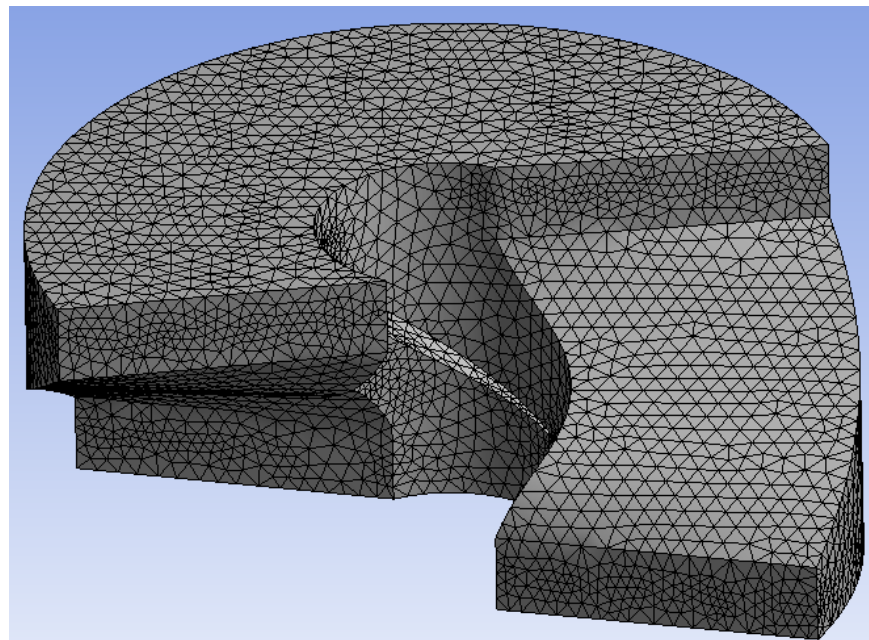


Figura 121. Selección del tipo de modelo que se tiene (Fluido o Sólido) en Ansys 16.0®.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.3. Capítulo III: Configuración del módulo CFX de Ansys16.0® para el análisis hidrodinámico de una turbina Kaplan

Luego de tener definida la discretización del modelo, se procede a utilizar el módulo de Ansys que permite analizar este tipo de procesos, el cual se encuentra en el árbol de herramientas (Toolbox) localizado en la zona izquierda de la ventana de trabajo, en la pestaña de Sistemas de Análisis (Analysis Systems), y es denotado con el nombre de “Fluid Flow (CFX)” (Figura 122); módulo el cual debe ser arrastrado (con clic sostenido) hasta la ventana Esquema del Proyecto (Project Schematic), en donde el mismo software demarca el área en el cual debe ser colocado el módulo (Figura 123).

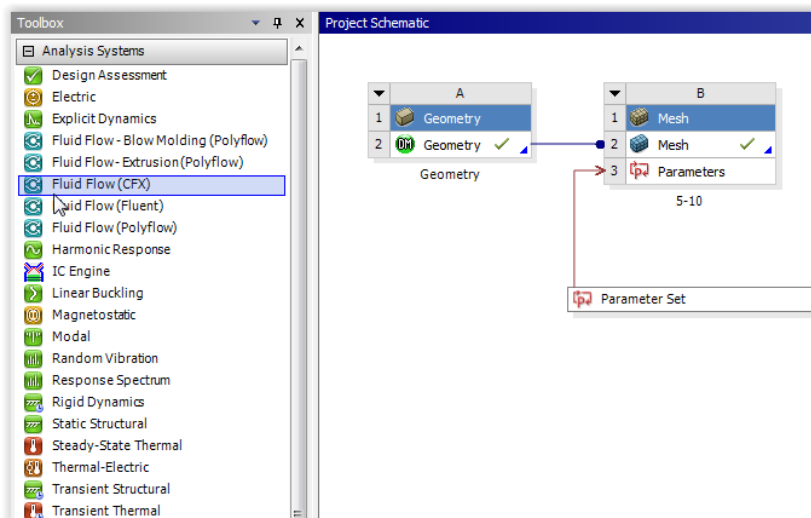


Figura 122. Selección del módulo CFX que será utilizado para el análisis de la turbina Kaplan.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

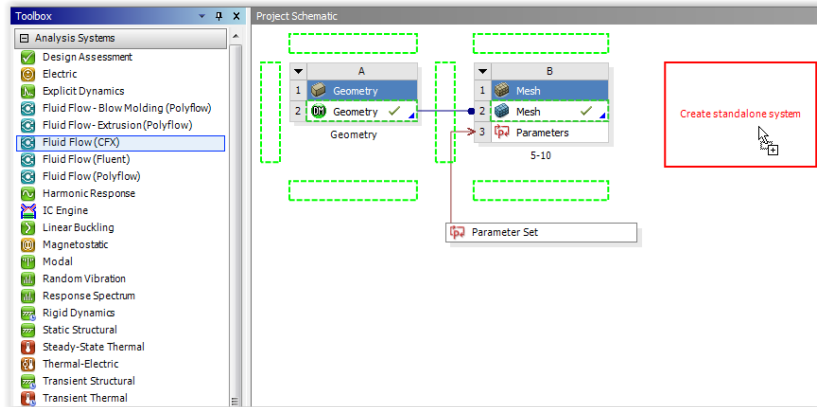


Figura 123. Ayuda de Ansys® para indicar la posición correspondiente del módulo CFX dentro de la ventana de trabajo.

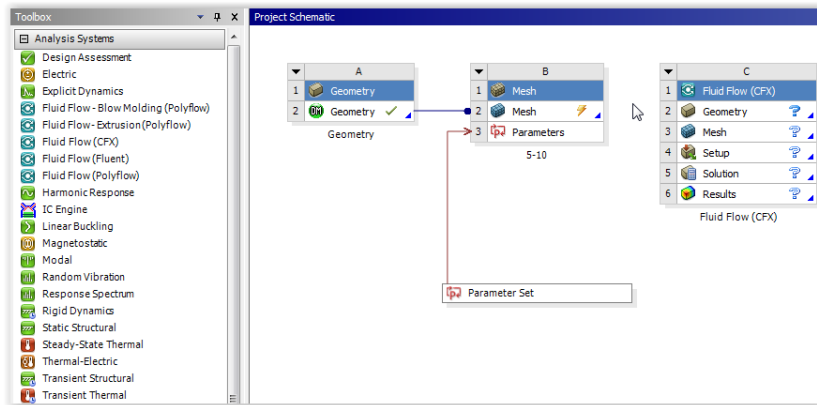


Figura 124. Ubicación del módulo CFX dentro de la ventana de trabajo de Ansys®.

Posteriormente, se procede a conectar el módulo de discretización o mallado con el módulo de CFX que acaba de ingresarse en el Esquema del Proyecto, lo cual se realiza arrastrando la casilla “Mesh” ubicada en la segunda (2da) posición del módulo de mallado, hasta la casilla “Setup” ubicada en la cuarta (4ta) posición del módulo CFX (Figura 125), acción después de la cual, se presenta una nueva visualización del módulo CFX (disminuye sus elementos o casillas), en donde puede observarse el lazo de conexión entre los módulos (Figura 126).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

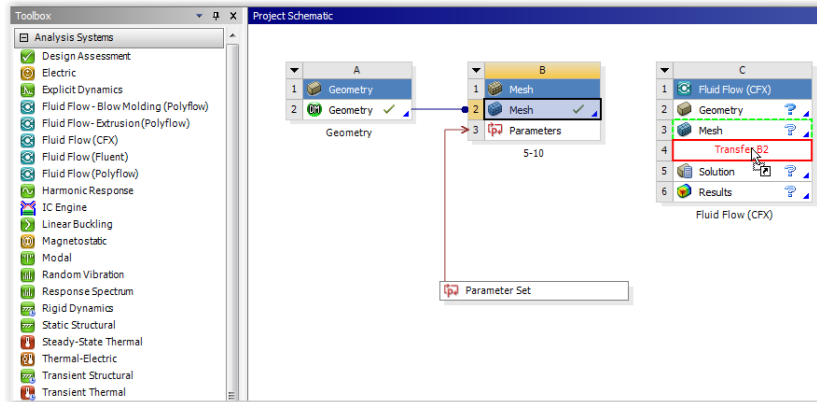


Figura 125. Forma de establecer la conexión entre los módulos de mallado y CFX.

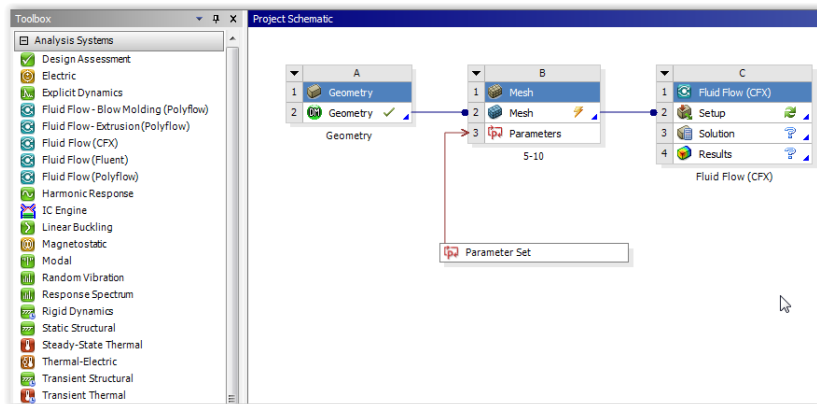


Figura 126. Conexión entre los módulos de geometría, malla y CFX.

Al realizarse el enlace entre los módulos debe actualizarse nuevamente la malla, haciendo clic derecho sobre la casilla “Mesh” y seleccionado “Update” de la ventana de opciones (Figura 127), verificando que al finalizar dicha actualización debe aparecer un chulito de color verde (Figura 128), garantizando que la acción se realizó exitosamente. Después de dicha verificación, se da doble clic en la casilla “Setup” del módulo CFX, con lo cual se abre una nueva ventana conocida por el nombre de CFX-Pre (Figura 129) en la cual se llevará a cabo la configuración necesaria para garantizar las condiciones del entorno al cual estará sometido el fluido circundante presente en el interior de la turbina Kaplan.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

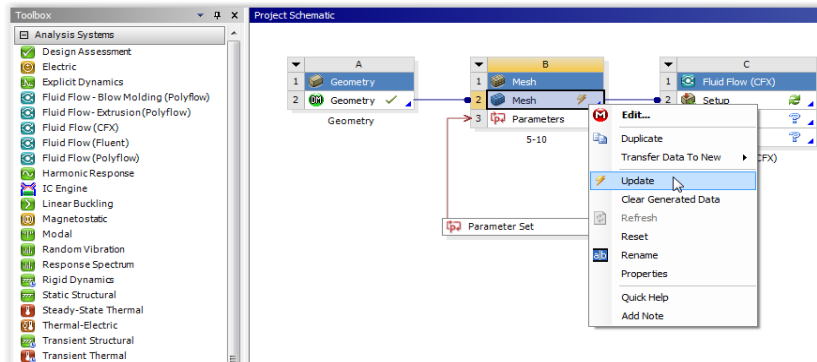


Figura 127. Actualización requerida de la malla para proceder a la configuración del módulo CFX.

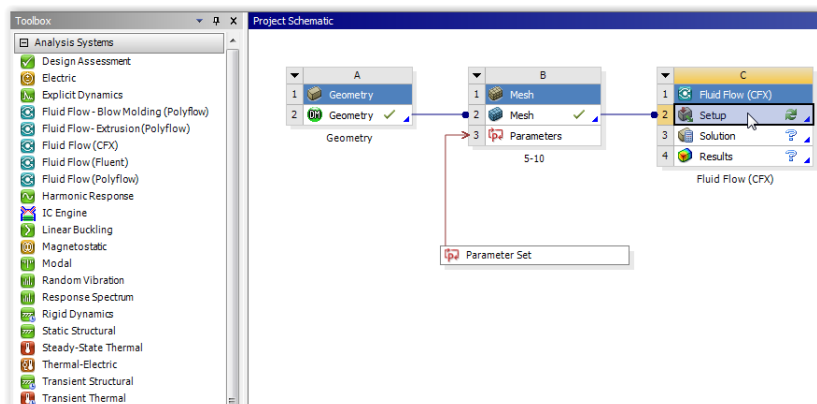


Figura 128. Forma rápida (doble clic) de entrar al módulo CFX para proceder con la configuración del análisis de la turbina Kaplan.

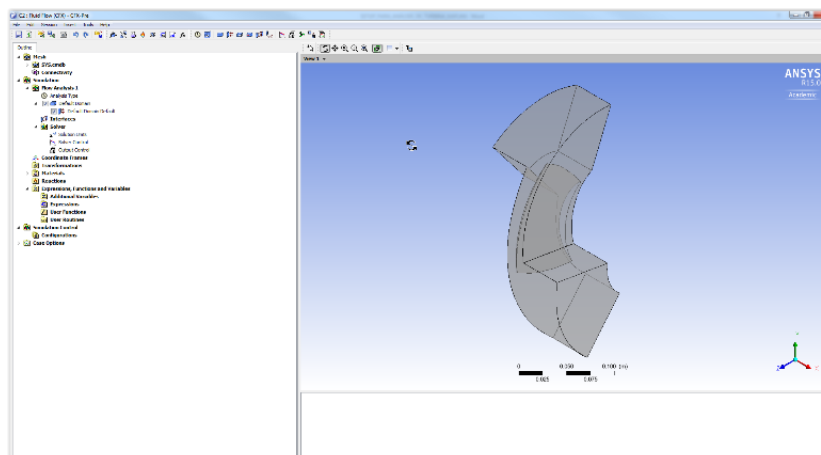


Figura 129. Interface de la ventana de configuración del módulo CFX.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Inicialmente, se genera una expresión de velocidad de rotación, que se utilizará más adelante para la configuración del dominio. Para esto, se encuentra en la zona izquierda de la ventana del CFX-Pre el árbol de configuraciones del módulo, el cual tiene por nombre “Outline”, en este se encuentra la carpeta “Expressions, Functions and Variables” que a su vez contiene una subcarpeta con el nombre de “Expressions” (Figura 130), a la cual debe darse clic derecho, posicionarse sobre la opción “insert” y seleccionar “Expression” (Figura 130), con lo cual se abre una ventana en la cual puede nombrarse la variable para una mayor comprensión de la misma a la hora de implementarla; en este caso se le da el nombre de “velocidadrotacion” (Figura 131) y se le asigna en la parte inferior de la nueva ventana que se abre un valor de - 450 RPM (Figura 132) que en este caso es el requerido para las condiciones de la turbina que será analizada, el signo +/- se establece siguiendo la ley de la mano derecha; finalmente se da clic en “Apply” y cerrar la ventana desde la zona superior derecha de dicha ventana (Figura 132).

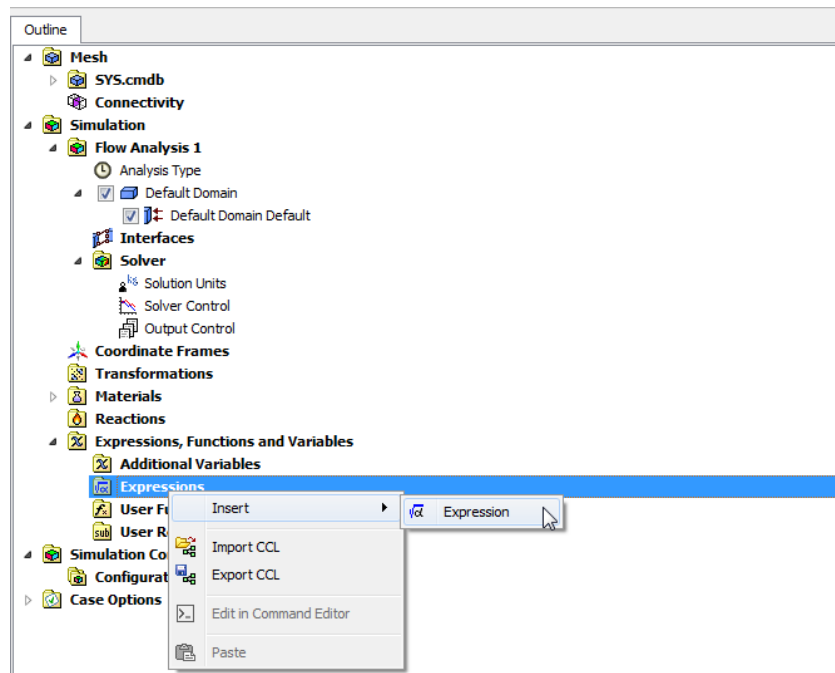


Figura 130. Proceso de generación de la expresión requerida para su posterior implementación dentro del módulo de configuración CFX.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

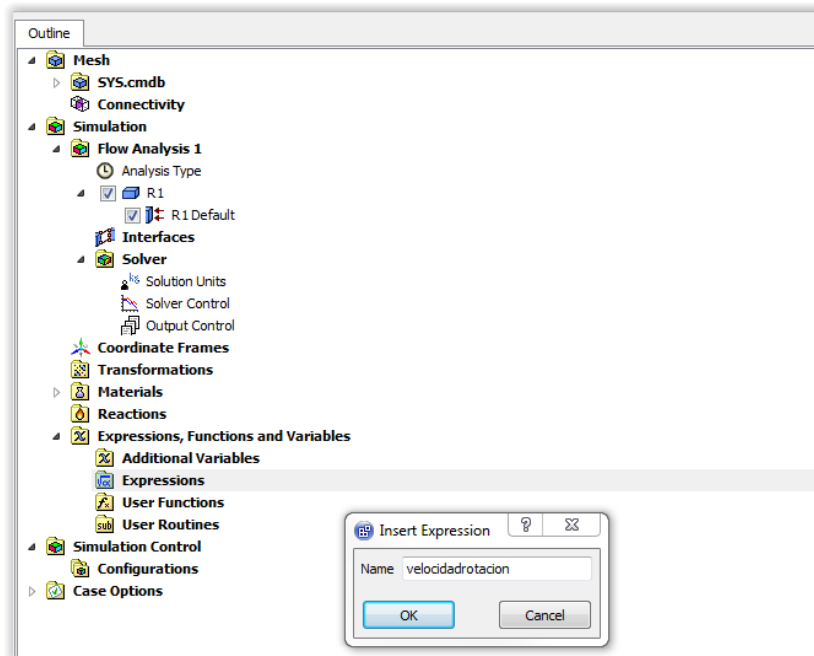


Figura 131. Nombre dado a la expresión insertada dentro del módulo de configuración CFX.

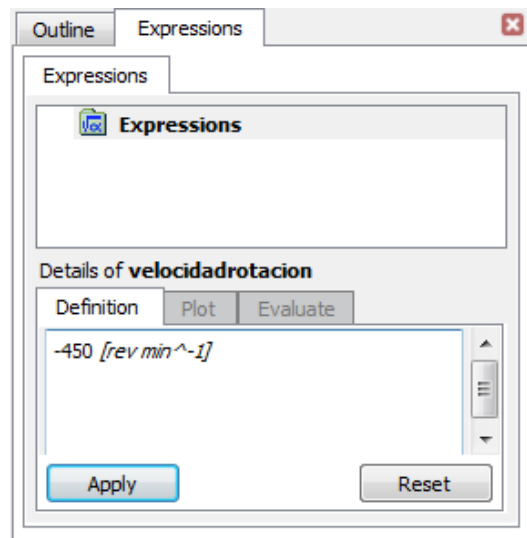


Figura 132. Asignación del valor requerido para la expresión de la velocidad de rotación del álabe en RPM.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

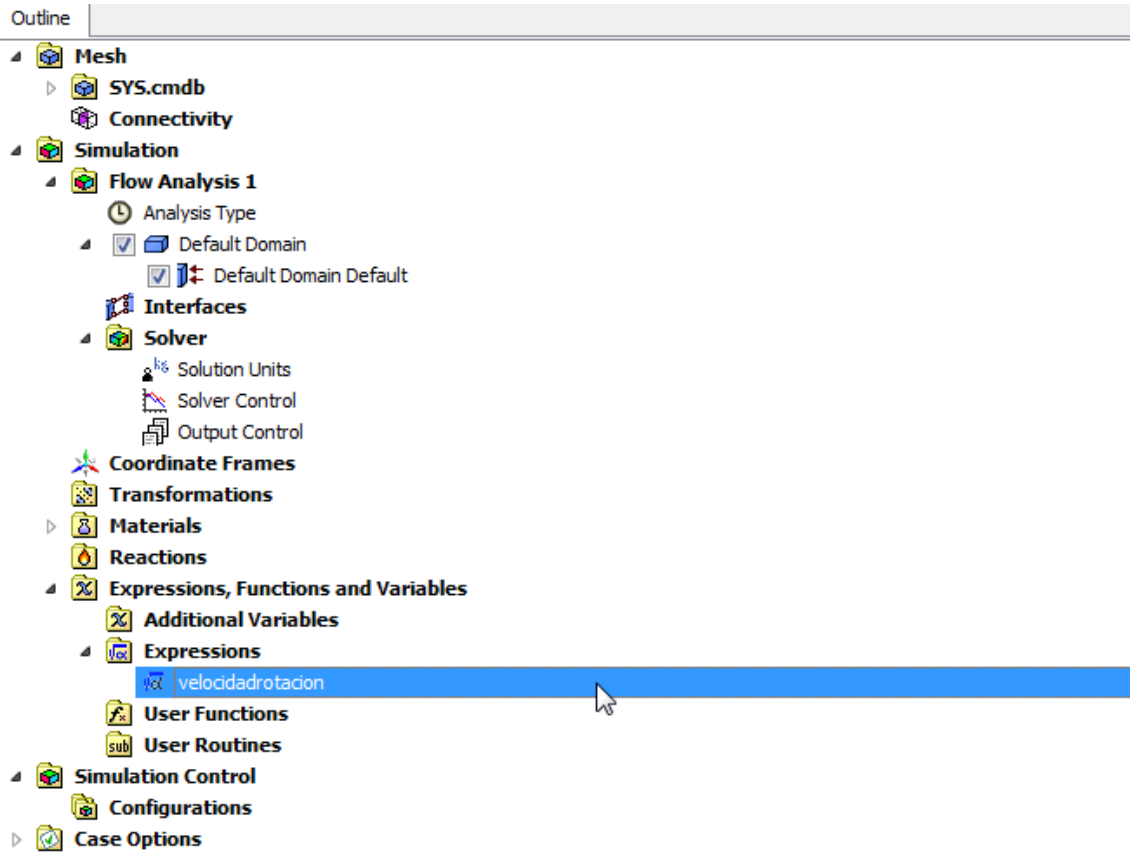


Figura 133. Expresión “velocidadrotacion” establecida en la ventana de configuración de CFX.

Luego de creada la expresión, se recomienda renombrar el dominio generado por defecto (Default Domain) por el software, el cual asume como dominio el modelo completo (el fluido circundante al interior de la turbina Kaplan). Este dominio se renombra con el fin de facilitar el entendimiento del usuario a medida que realiza la configuración de cada una de las partes o zonas de influencia de su modelo. Para esto, se debe dar clic derecho sobre el dominio generado por defecto (Default Domain), ubicado en la zona izquierda de la ventana del módulo CFX-Pre, en el árbol Outline (Figura 134); en este caso se le da el nombre de “R1” por facilidad (Figura 135) y se le da doble clic para entrar a configurar las condiciones globales que afectarán todo el dominio como es el caso del tipo de fluido y de turbulencia del mismo en el interior de dicha turbina.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

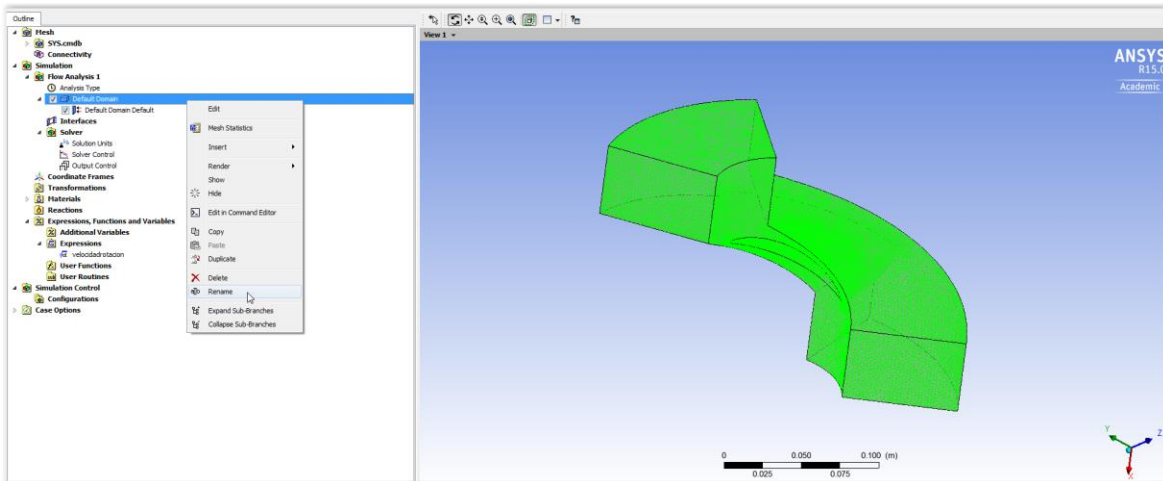


Figura 134. Renombrado del dominio principal del fluido circundante de la turbina Kaplan.

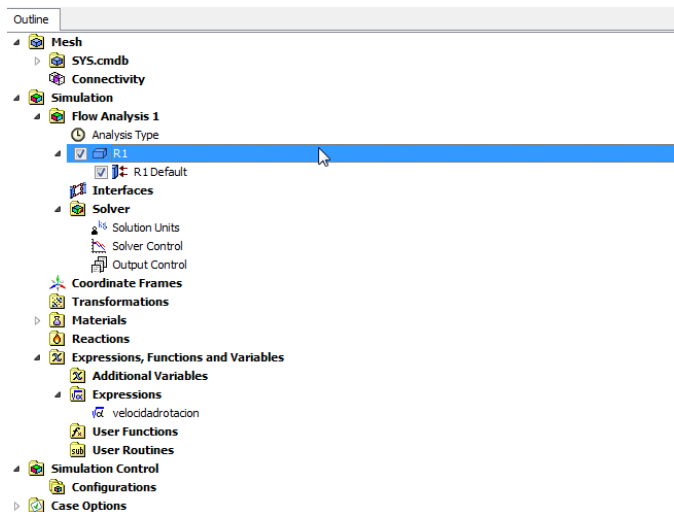


Figura 135. Nuevo nombre ("R1") dado al dominio principal del fluido circundante de la turbina Kaplan.

Al realizar la acción anterior, se abre una nueva ventana constituida por tres pestañas, dentro de las cuales se procede a configurar en la pestaña de configuraciones básicas (Basic Settings), el tipo de dominio (Domain Type) como dominio de fluido (Fluid Domain) (Figura 136), en la definición de fluidos y partículas (Fluid Particle Definitions) se presenta por defecto un fluido con el nombre de "Fluid 1" el cual está constituido por aire a 25°C, el cual en este caso se elimina dado que el fluido requerido es agua, por lo cual se selecciona dicho fluido y se da clic en la herramienta remover (con forma de X) que aparece la lado derecho

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de dicha ventana (*Figura 137*) para remover dicho fluido, seguido de un clic en la hoja ubicada sobre la herramienta remover (*Figura 138*), con el fin de crear el nuevo fluido con el nombre “Water” (en este caso) nombrado así para mayor comprensión (*Figura 139*). Y luego se establece el material del que está compuesto el fluido como agua (“Water”) (*Figura 140*).

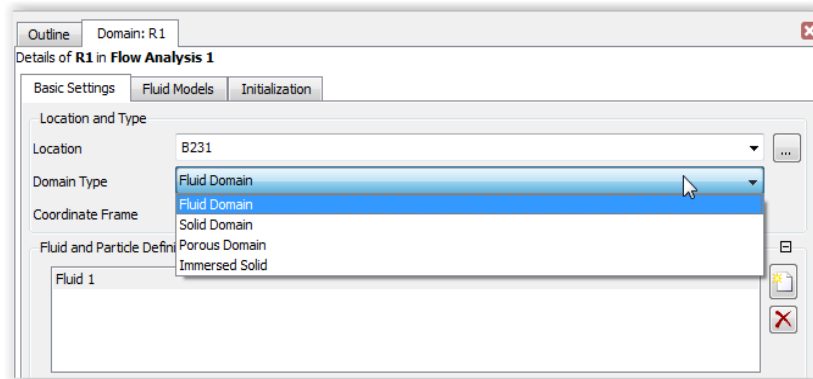


Figura 136. Selección del tipo dominio del modelo (establecido como fluido).

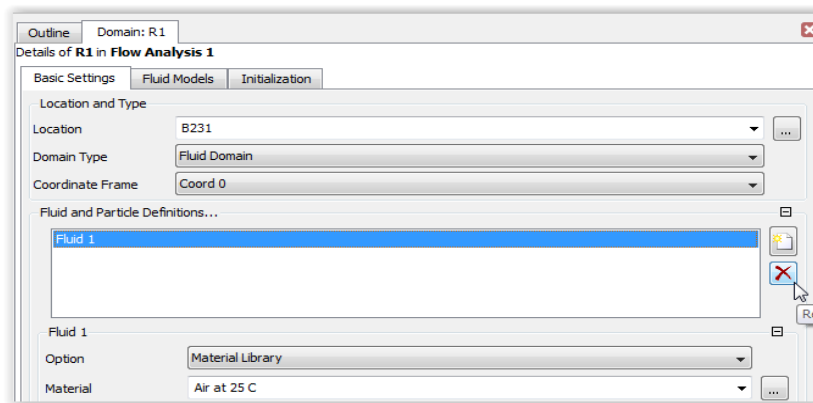


Figura 137. Eliminación de fluido establecido por defecto (aire a 25 °C) por el módulo de configuración CFX.

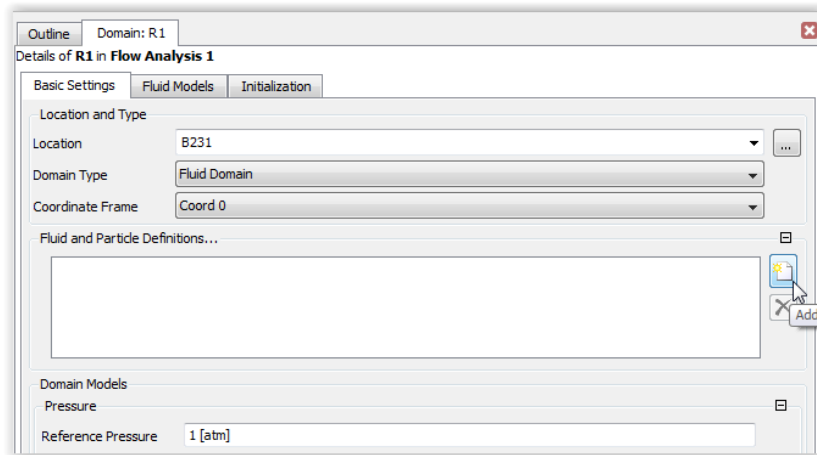


Figura 138. Generación del nuevo fluido que regirá el dominio de la turbina Kaplan.

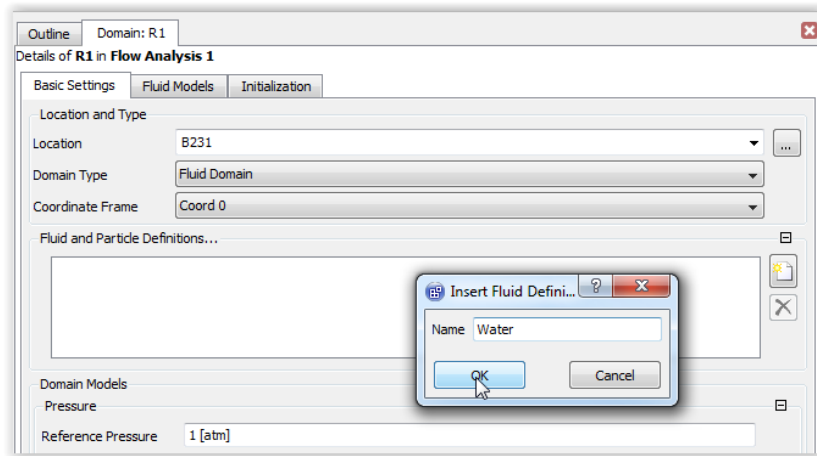


Figura 139. Nombre dado al nuevo fluido definido para el dominio.

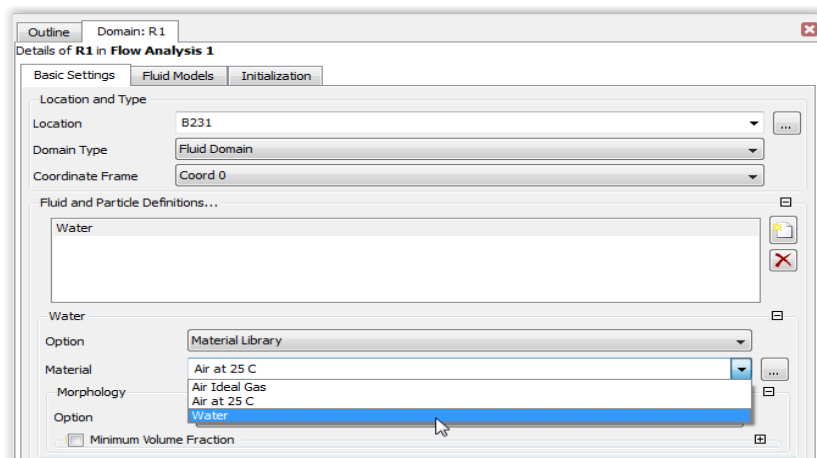


Figura 140. Material (agua) definido para la constitución del fluido de dominio.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego, debe seleccionarse en el “Domain Motion” en “Option”, utilizando la pestaña desplegable, la opción “Rotating”, además de activar el cuadro de “Alternate Rotation Model” y dar clic derecho sobre el campo de “Angular Velocity” en donde se ingresa la expresión creada previamente, posicionándose sobre la opción “Expressions” y seleccionando la variable “velocidadrotacion = - 450 [rev min⁻¹]” (Figura 141); seguido de la definición del eje de rotación de la turbina que en este caso se presenta en el eje X y luego dando clic sobre la opción “Apply” para que el programa aplique los datos (Figura 142).

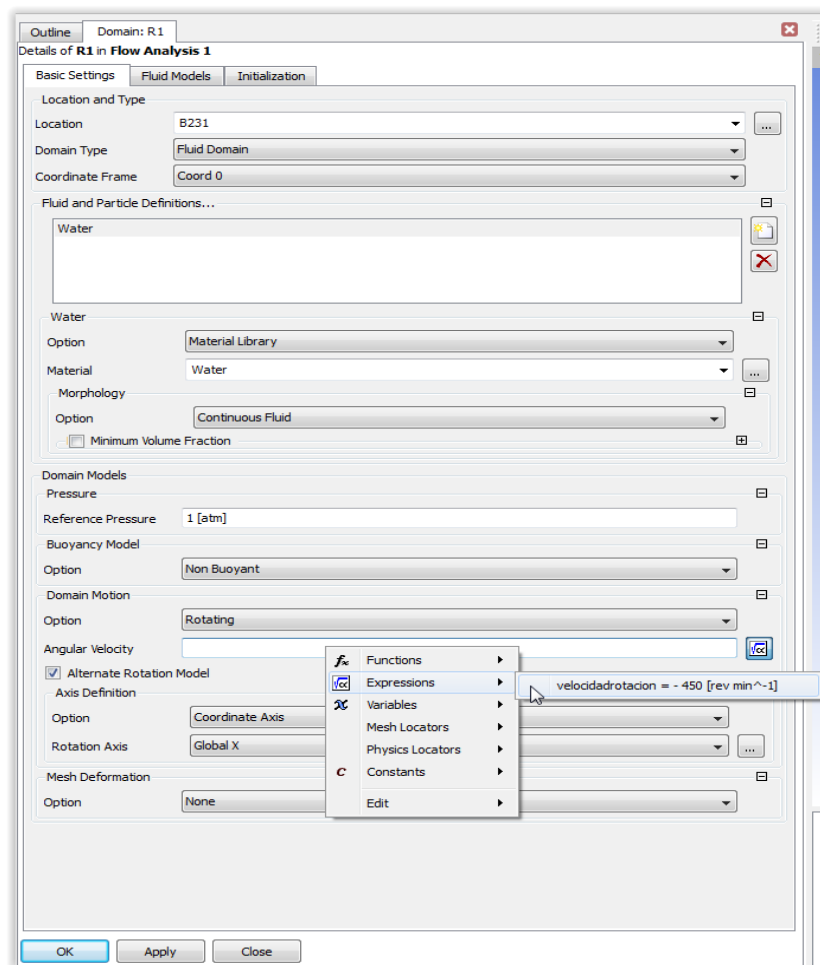


Figura 141. Utilización de la variable “velocidadrotacion” definida previamente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

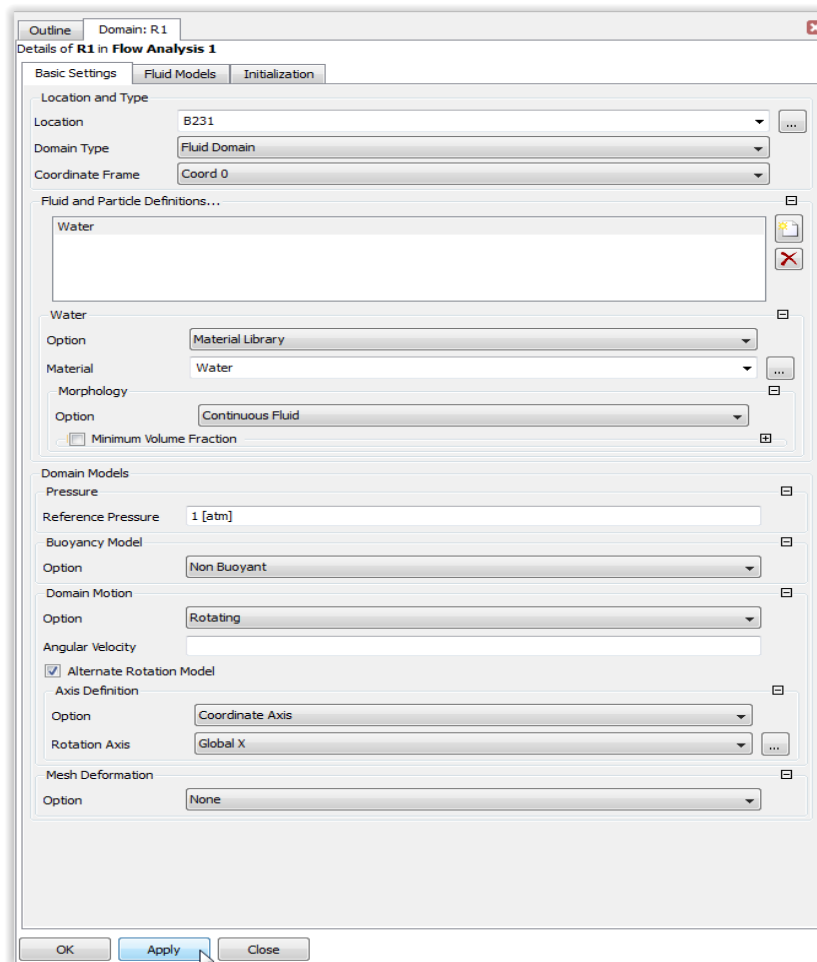


Figura 142. Configuración básica (Basic Settings) del dominio principal para el fluido de un álabe de turbina Kaplan.

Activar la pestaña “Fluid Models” ubicada en la zona superior de la ventana (Figura 143). En esta ubicar “Heat Transfer” y en “Option” seleccionar de la pestaña desplegable la opción “none” (Figura 143) y en la zona de “Turbulence” seleccionar en “Option” el modelo “Shear Stress Transport” (Figura 143) y finalmente clic en Ok.

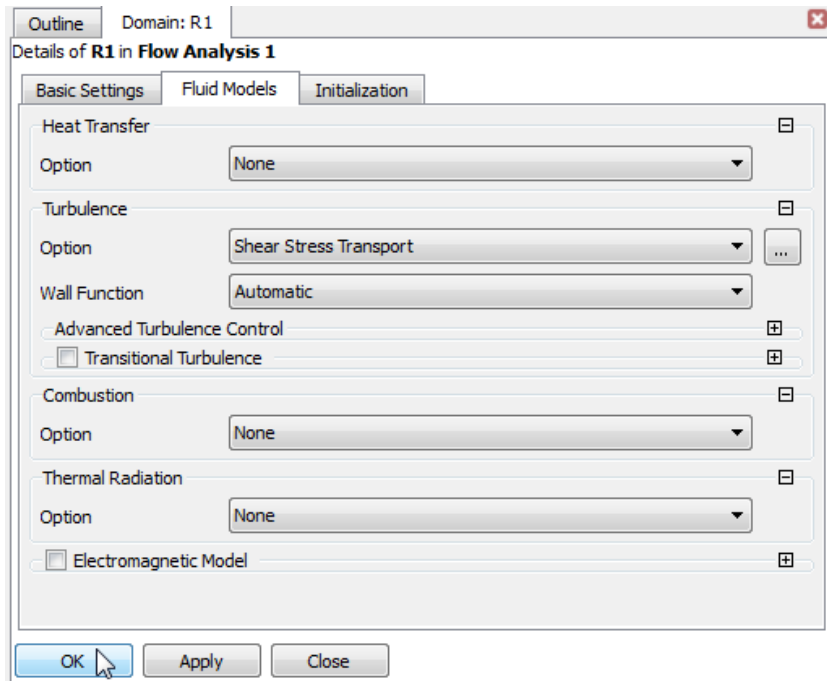


Figura 143. Configuración de los modelos de fluido (Fluid Models) para un álabe de turbina Kaplan.

Lo que se hace a continuación, es definir cada uno de los dominios del modelo, para lo cual se hace clic derecho sobre el dominio definido anteriormente como “R1”, se selecciona la opción “insert” y luego “Boundary” (Figura 144), abriendo una pequeña ventana que permite nombrar dicho dominio a gusto propio; para este caso, se nombra (por facilidad de entendimiento) el primer dominio que será definido, con el nombre de “R1 Blade”, dando posteriormente clic en “OK” (Figura 145) para acceder a la ventana de configuraciones del mismo.

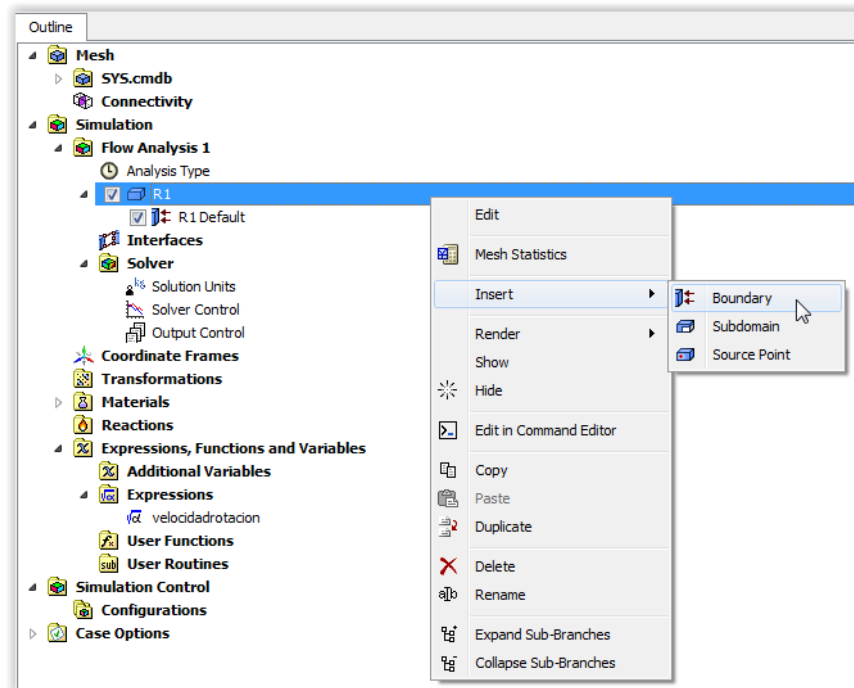


Figura 144. Generación de los subdominios del modelo (fluido de una turbina Kaplan).

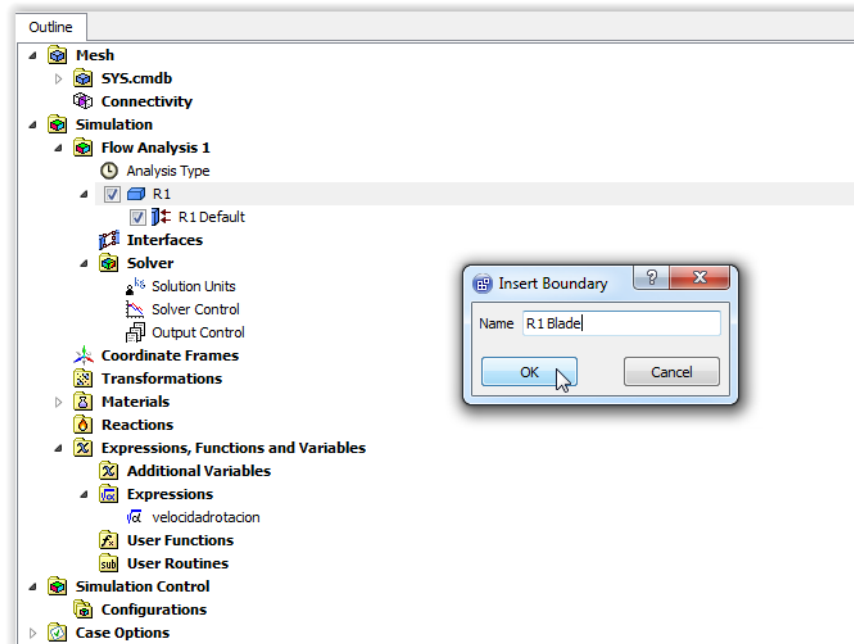


Figura 145. Nombre y generación del subdominio del álabe ("R1 Blade") de la turbina Kaplan.

Ventana en la cual, en la pestaña “Basic Settings”, se debe establecer el “Boundary Type” como “Wall”, debido a que se requiere que el software comprenda que dicha superficie es la pared del álabe y se selecciona la zona de interés “Blade” en “Location”, utilizando el desplegable, en el cual se encuentran establecidos los nombres de las superficies, definidos previamente en la etapa de mallado o discretización. Estableciendo “Frame Type” como Rotating y luego “OK” (Figura 146) para que el programa capte los cambios realizados y retorne a la ventana principal del CFX-Pre.

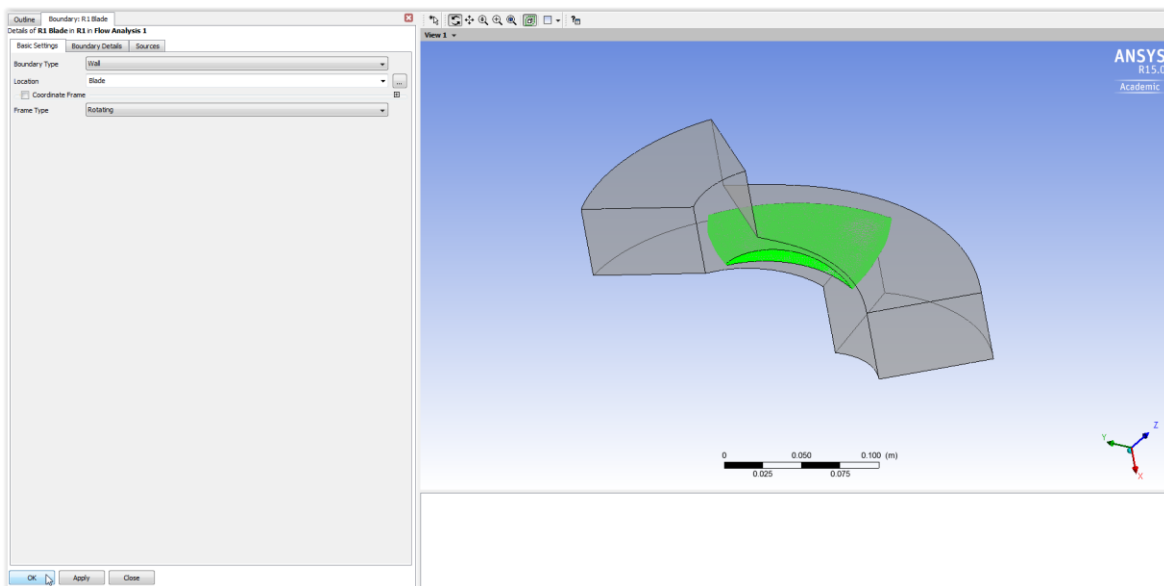


Figura 146. Configuración del subdominio del álabe (R1 Blade) de la turbina Kaplan.

Siguiendo con la definición de dominios, se sigue el procedimiento anterior para generar un nuevo dominio, al cual se le dará el nombre de “R1 Hub” y “OK” (Figura 147) para acceder a la ventana de configuración del mismo; en la cual se establece el “Boundary Type” como “Wall”, se selecciona del desplegable de “Location” la zona de interés “Hub”, se debe activar la casilla “Coordinate Frame”, lo cual habilitará una nueva sección llamada también “Coordinate Frame” en la cual se debe elegir la opción “Coord 0”, definir el “Frame Type” nuevamente como “Rotating” y “OK” (Figura 148) para finalizar la configuración de este dominio.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

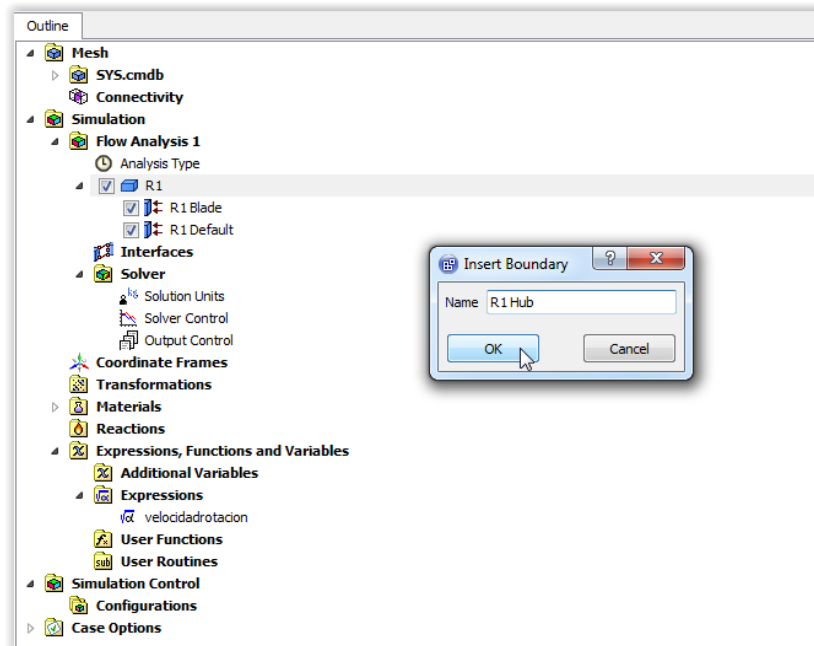


Figura 147. Nombre y generación del subdominio del eje (“R1 Hub”) de la turbina Kaplan.

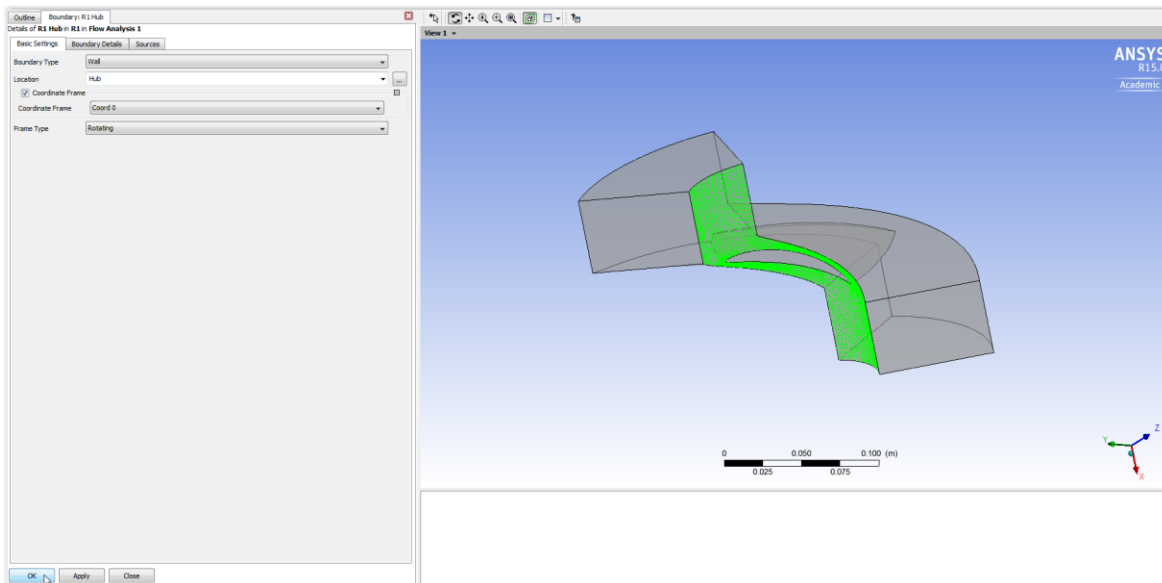


Figura 148. Configuración del subdominio del eje (R1 Hub) de la turbina Kaplan.

Se genera un nuevo dominio, siguiendo los pasos dados anteriormente, con el nombre de “R1 Inlet” y luego clic en “OK” (Figura 149). Seleccionando en esta ocasión la opción “Inlet” tanto para “Boundary Type” como para “Location”, desactivar la casilla “Coordinate Frame”, definir “Frame Type” como “Stationary” y dar clic en “Apply” (Figura 150).

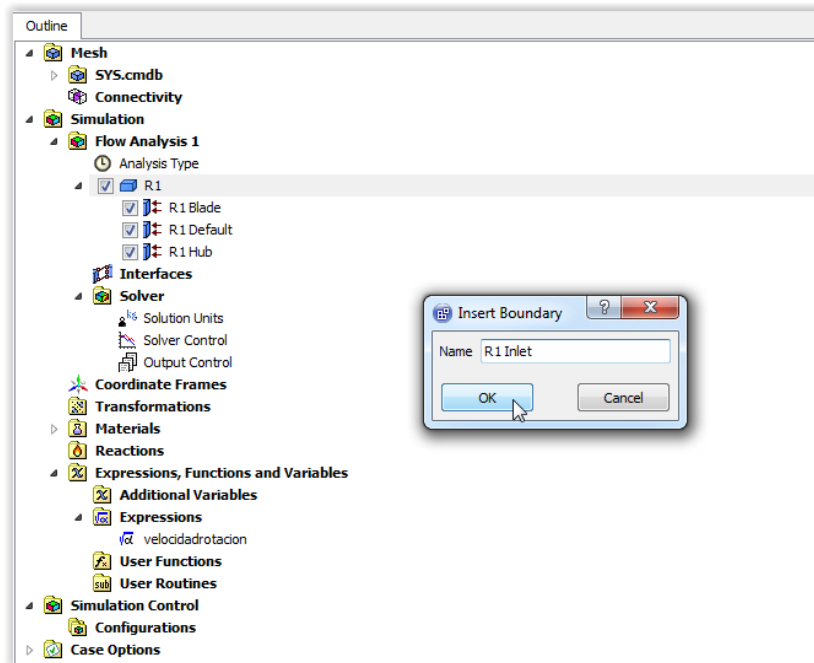


Figura 149. Nombre y generación del subdominio de la entrada (“R1 Inlet”) de la turbina Kaplan.

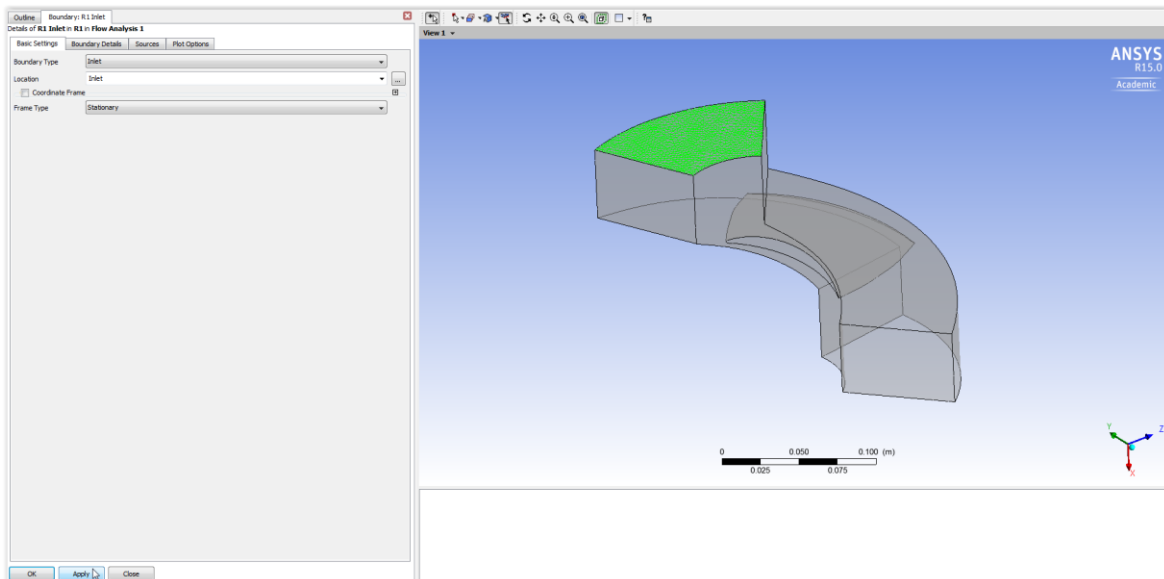


Figura 150. Configuración de los parámetros básicos (Basic Settings) del subdominio de la entrada (R1 Inlet) de la turbina Kaplan.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego, en la pestaña “Boundary Details”, definir en “Option” de las secciones “Flow Regime”, “Mass And Momentum”, “Flow Direction” y “Turbulence”, la opción “Subsonic”, “Static Pressure.”, “Normal to Boundary Condition” y “Medium (Intensity = 5%)” respectivamente, ingresando en la casilla “Static Pressure” el valor de la presión de entrada a la turbina, la cual para este caso es de 98.1 [kPa] (valor obtenido utilizando la ecuación de presión estática de fluido, la cual se determina mediante el producto de la altura [10 m] x la gravedad [9.81 m/s²] x la densidad del agua [1000 kg/m³]) y finalmente clic en “OK” para generar los cambios (*Figura 151*).

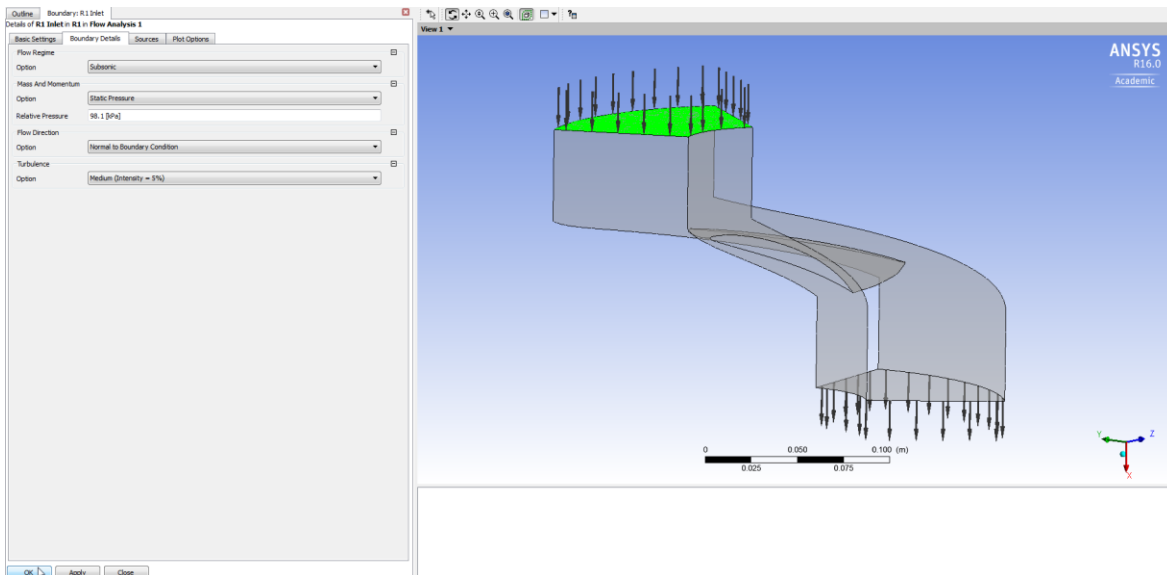


Figura 151. Configuración de los parámetros de detalle de frontera (Boundary Details) del subdominio de la entrada (R1 Inlet) de la turbina Kaplan.

Se genera un nuevo dominio siguiendo los pasos dados anteriormente, con el nombre de “R1 Outlet” y luego clic en “OK” (*Figura 152*). Seleccionando la opción “Outlet” tanto para “Boundary Type” como para “Location”, desactivar la casilla “Coordinate Frame”, definir “Frame Type” como “Stationary” y dar clic en “Apply” (*Figura 153*).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

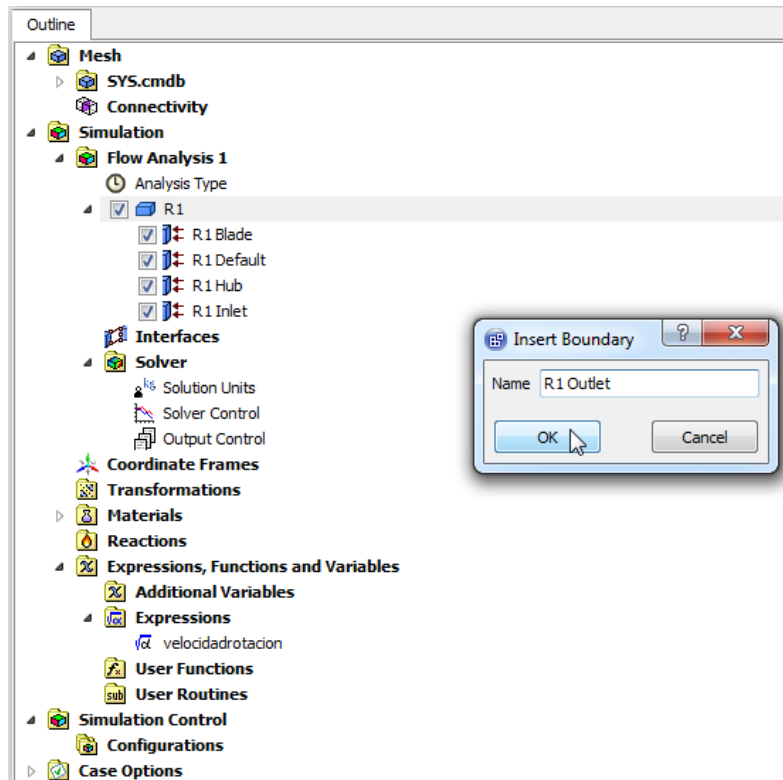


Figura 152. Nombre y generación del subdominio de la salida (“R1 Outlet”) de la turbina Kaplan.

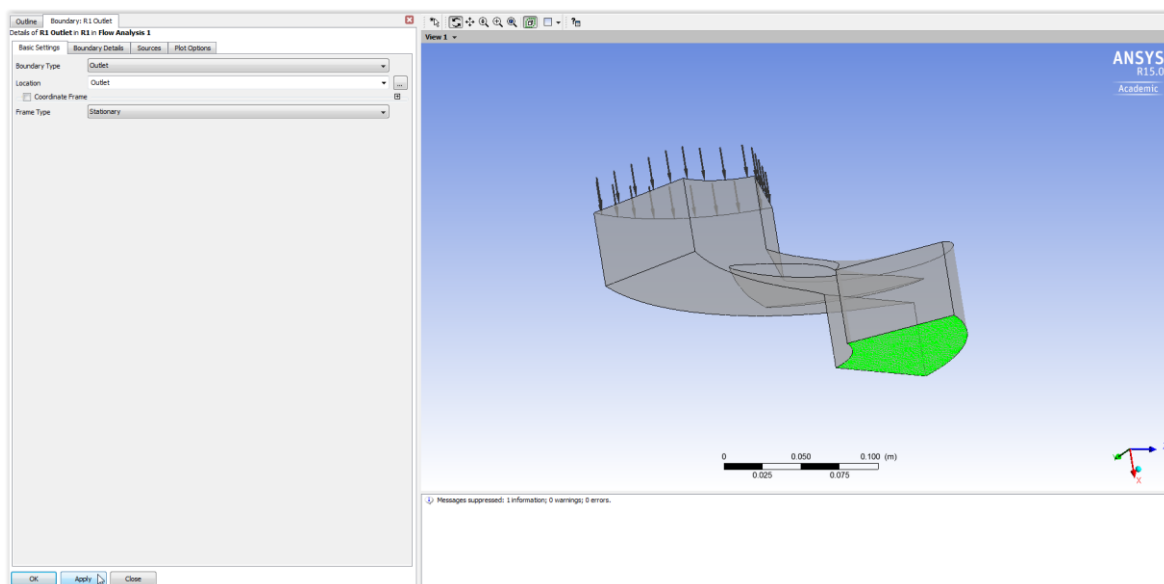


Figura 153. Configuración de los parámetros básicos (Basic Settings) del subdominio de la salida (R1 Outlet) de la turbina Kaplan.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego, en la pestaña “Boundary Details”, definir en “Option” de las secciones “Flow Regime”, “Mass And Momentum”, y “Pressure Averaging”, la opción “Subsonic”, “Average Static Pressure” y “Average Over Whole Outlet” respectivamente, ingresando en la casilla “Relative Pressure” el valor de la presión de salida a la turbina de 0 [atm], dejar el valor de 0.05 que tiene por defecto la sección “Pres. Profile Blend” y finalmente clic en “OK” para generar los cambios (Figura 154).

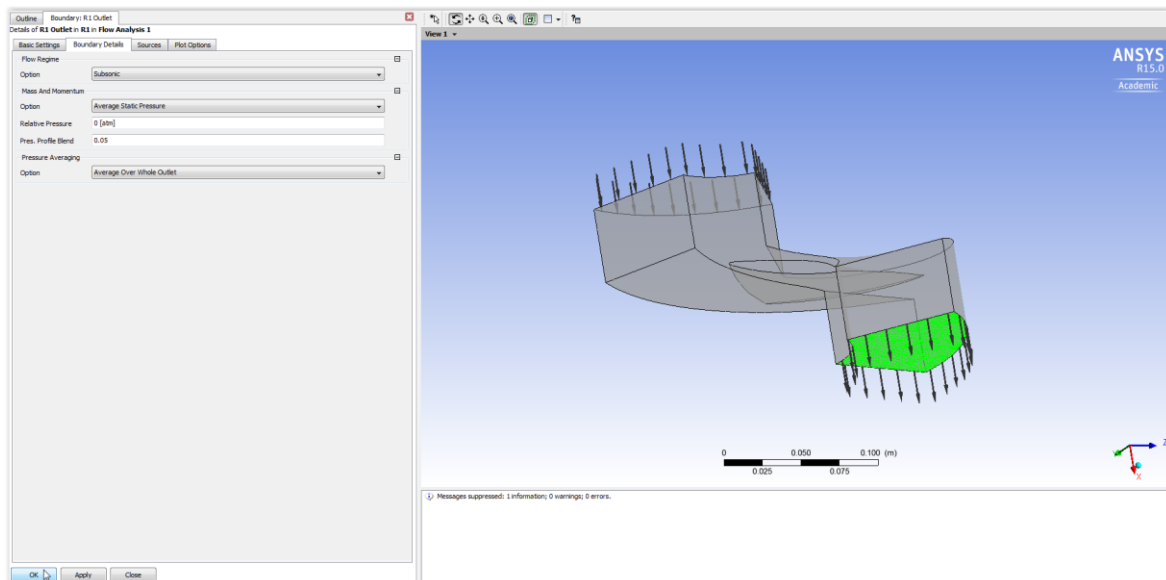


Figura 154. Configuración de los parámetros de detalle de frontera (Boundary Details) del subdominio de la Salida (R1 Outlet) de la turbina Kaplan.

Se genera un último dominio siguiendo los pasos dados anteriormente, con el nombre de “R1 Shroud” y luego clic en “OK” (Figura 155). Seleccionando en “Boundary Type” la opción “Wall”, desactivar la casilla “Coordinate Frame”, definir “Frame Type” como “Rotating” y dar clic en “OK” (Figura 156).

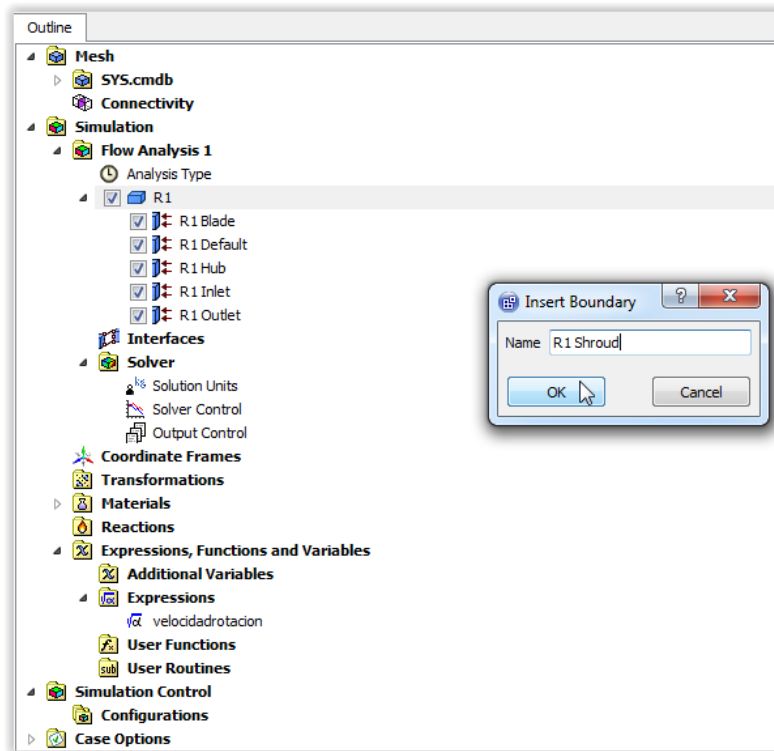


Figura 155. Nombre y generación del subdominio de la pared exterior (“R1 Shroud”) de la turbina Kaplan.

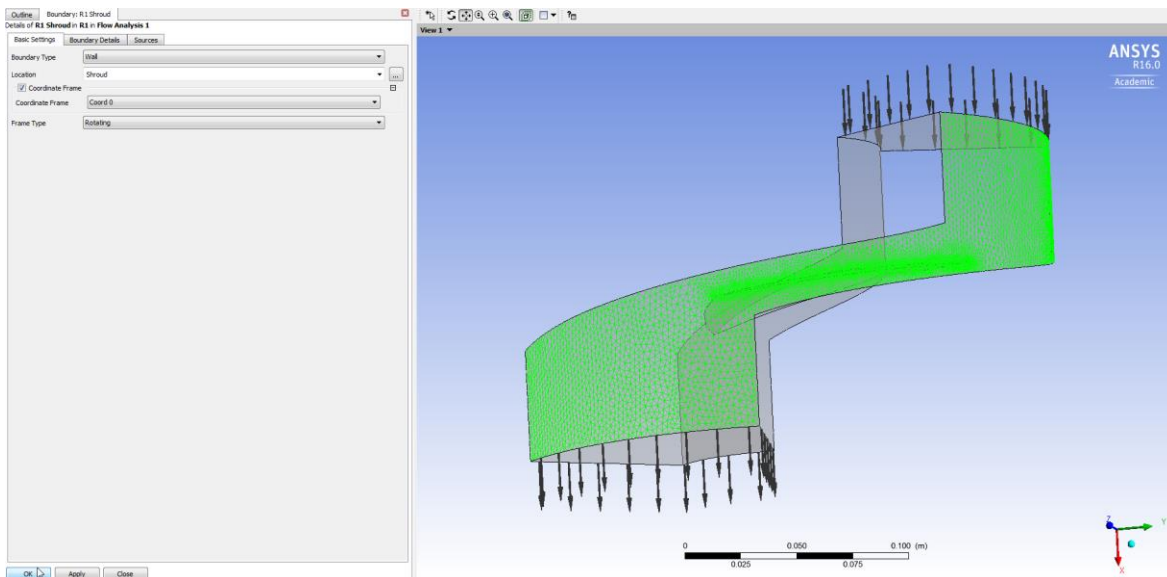


Figura 156. Configuración de los parámetros básicos (Basic Settings) del subdominio de la salida (R1 Outlet) de la turbina Kaplan.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A continuación se establecen las interfaces generadas en la zona central del fluido, para lo cual se debe dar clic derecho sobre la herramienta “Interfaces”, ubicada en la zona izquierda de la ventana del módulo CFX-Pre, en el árbol Outline, seleccionar “Insert” y luego “Domain Interface” (Figura 157), tras lo cual se abre la ventana que permite modificar el nombre de dicha interfaz; La primer interfaz, se nombra “R1 to R1 Periodic 1” (nombre de libre elección por parte del usuario) y clic en “OK” (Figura 158) para acceder a la ventana de configuración de la misma.

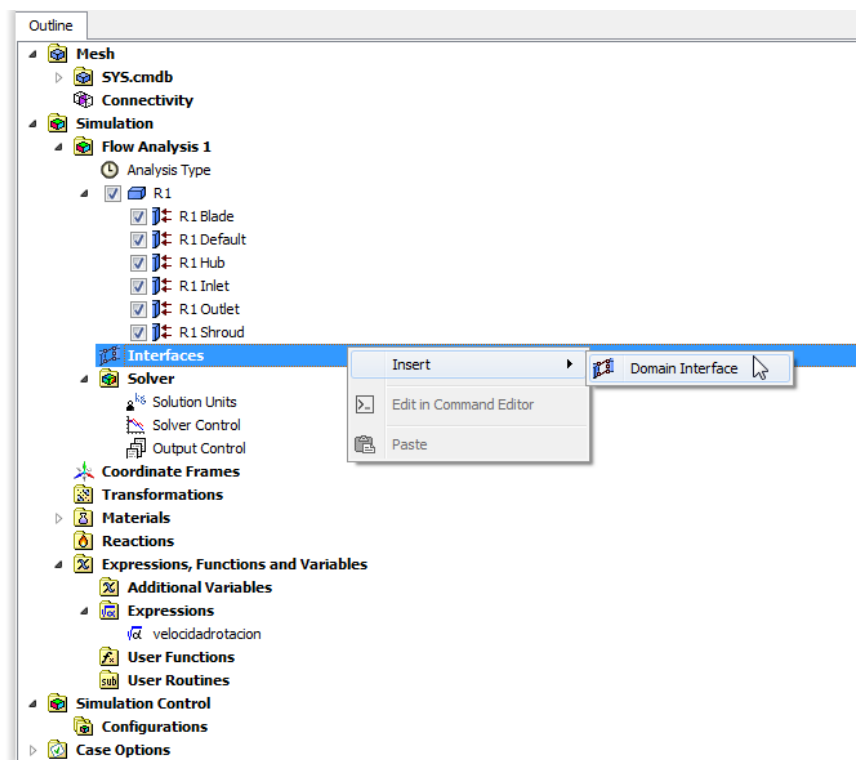


Figura 157. Generación de las interfaces de dominio del modelo (fluido de una turbina Kaplan).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

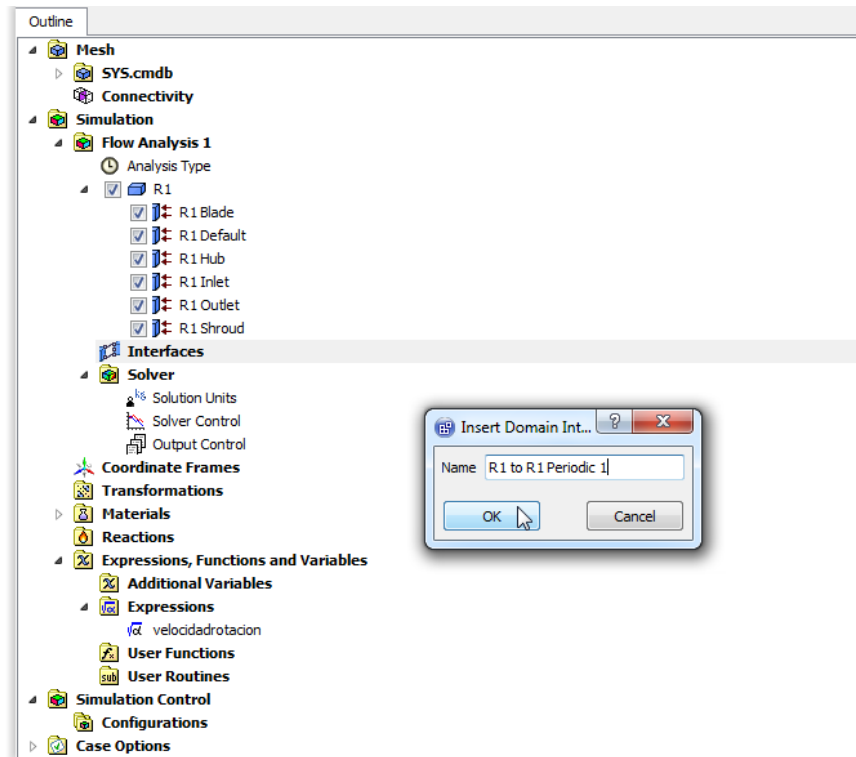


Figura 158. Nombre y generación de la interfaz de dominio de la zona inferior del fluido (“R1 to R1 Periodic 1”) de la turbina Kaplan.

Ventana de configuración en la cual se establece en la pestaña “Basic Settings”, el parámetro “Interface Type” como “Fluid Fluid”, el “Domain (Filter)” de la sección “Interface Side 1” como “R1”, la “Region List” como “p1a”, el “Domain (Filter)” de la sección “Interface Side 2” como “R1”, la “Region List” como “p1b”, “Option” de la sección “Interface Models” como “Rotational Periodicity”, “Option” de la sección “Axis Definition” como “Coordinate Axis” y “Rotation Axis” como “Global X”, seguido de clic en “OK” (Figura 159) para finalizar la configuración de la interfaz.

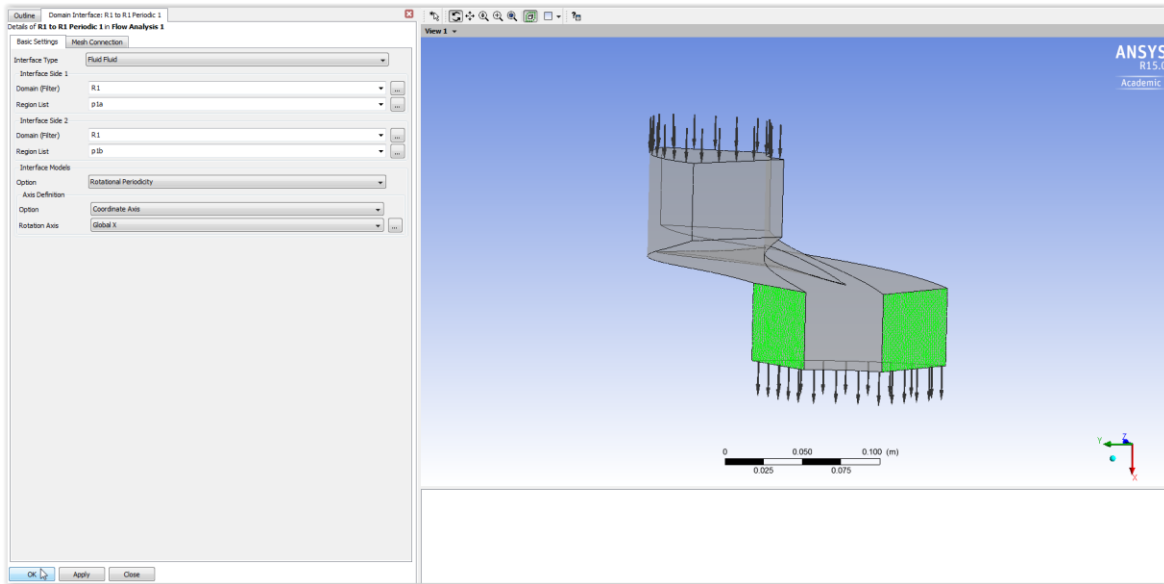


Figura 159. Configuración de la interface de dominio de la zona inferior del fluido (“p1a a p1b”) de la turbina Kaplan.

Se genera una segunda interfaz siguiendo los pasos planteados anteriormente, con el nombre de “R1 to R1 Periodic 2” y clic en “OK” (Figura 160) para acceder a la ventana de configuración de la misma.

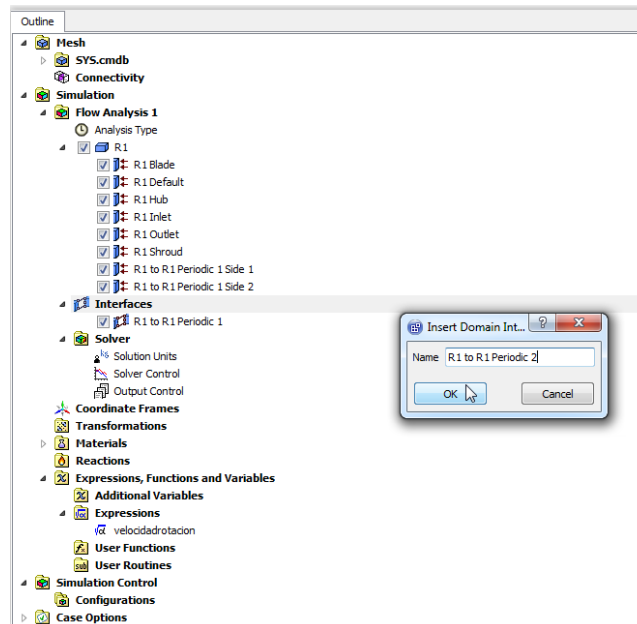


Figura 160. Nombre y generación de la interfaz de dominio de la zona media del fluido (“R1 to R1 Periodic 2”) de la turbina Kaplan.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ventana de configuración en la cual, se establecen los mismos parámetros definidos en la interfaz anterior, con la diferencia de que se seleccionan en el parámetro “Region List”, las opciones “p2a” y “p2b” en las secciones “Interface Side 1” e “Interface Side 2”, respectivamente, seguido de clic en “OK” (Figura 161) para finalizar la configuración de la interface.

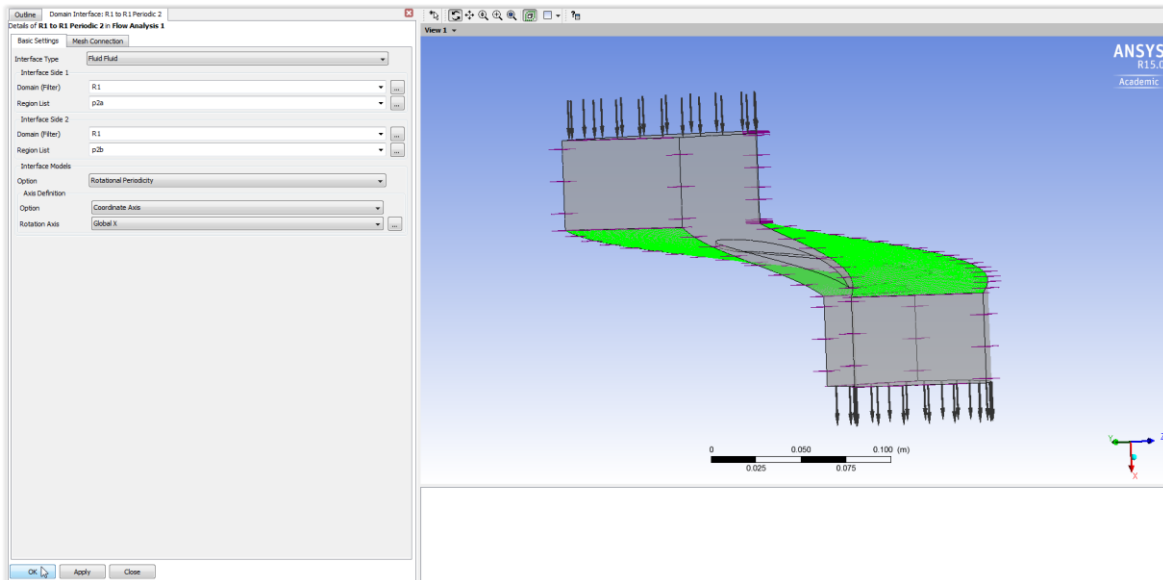


Figura 161. Configuración de la interface de dominio de la zona media del fluido (“p2a a p2b”) de la turbina Kaplan.

Se genera una tercer y última interfaz siguiendo los pasos planteados anteriormente, con el nombre de “R1 to R1 Periodic 3” y clic en “OK” (Figura 162) para acceder a la ventana de configuración de la misma.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

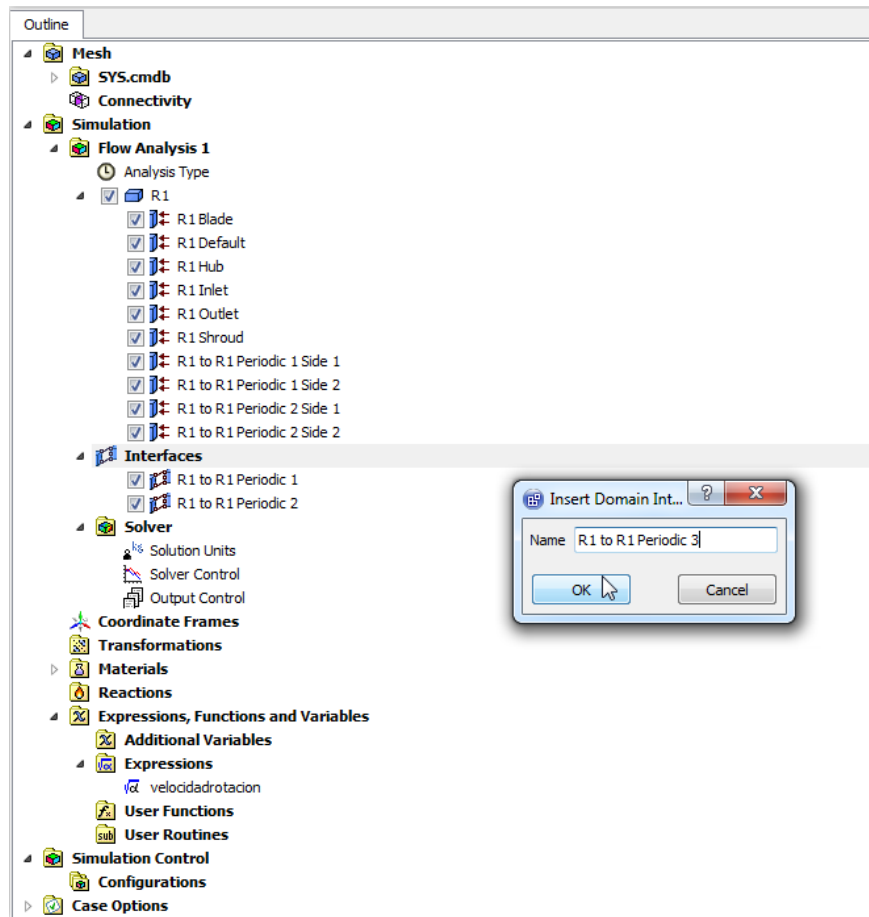


Figura 162. Nombre y generación de la interfaz de dominio de la zona superior del fluido (“R1 to R1 Periodic 3”) de la turbina Kaplan.

Ventana de configuración en la cual, se establecen los mismos parámetros definidos en la interfaz anterior, con la diferencia de que se seleccionan en el parámetro “Region List”, las opciones “p3a” y “p3b” en las secciones “Interface Side 1” e “Interface Side 2”, respectivamente, seguido de clic en “OK” (Figura 163) para finalizar la configuración de la interface.

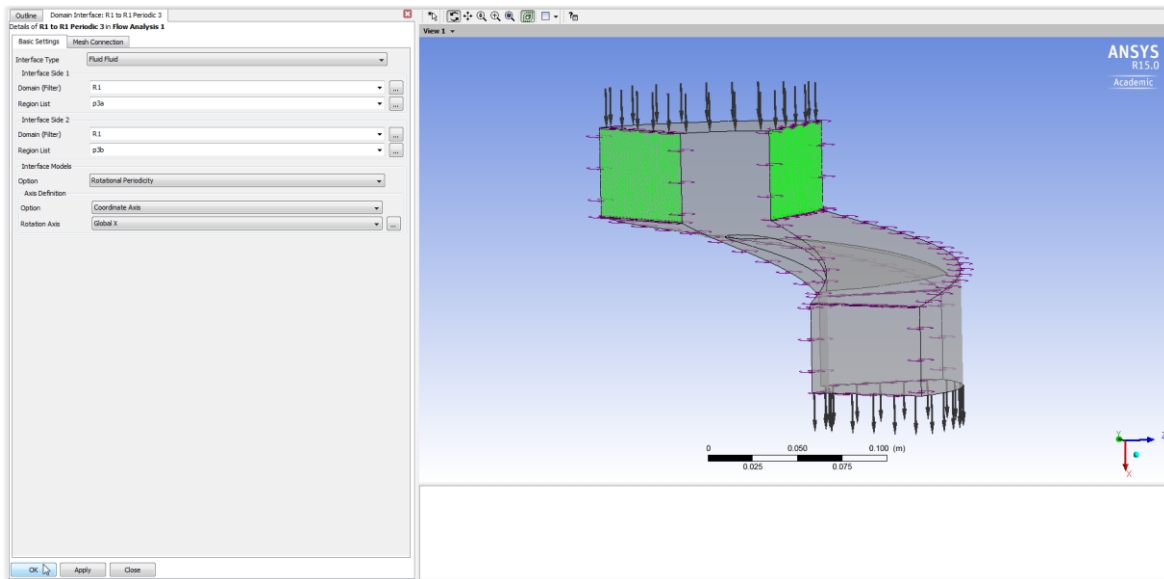


Figura 163. Configuración de la interface de dominio de la zona superior del fluido (“p3a a p3b”) de la turbina Kaplan.

Por último, se ingresa con doble clic a “Solver Control”, localizado en la pestaña “Outline” de la ventana “CFX-Pre” (Figura 164), con el fin de aumentar el límite de iteraciones que podrán llevarse a cabo, de ser necesario, a la hora de realizar la simulación; el valor de dichas iteraciones se aumenta (en este caso) de 100 a 1000 o al valor que considere pertinente el usuario y se da clic en “OK” para que el software genere los cambios (Figura 165).

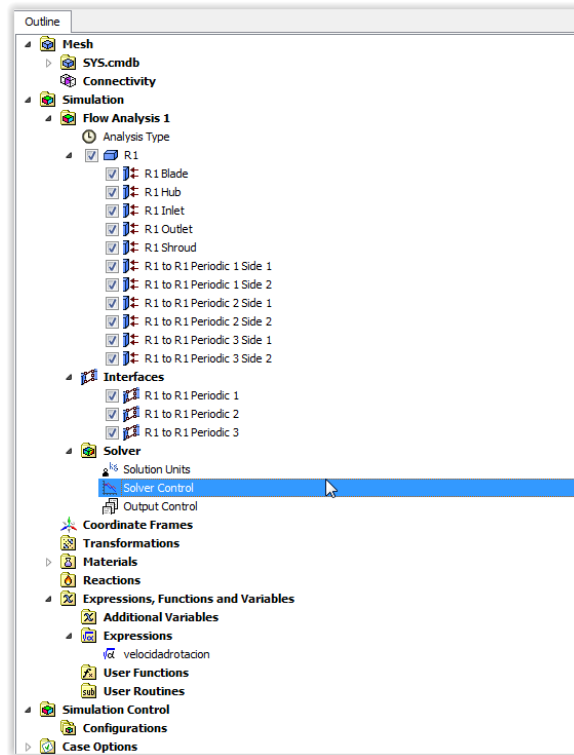


Figura 164. Forma de ingresar a la configuración del control de solución (“Solver Control”) dentro del módulo CFX.

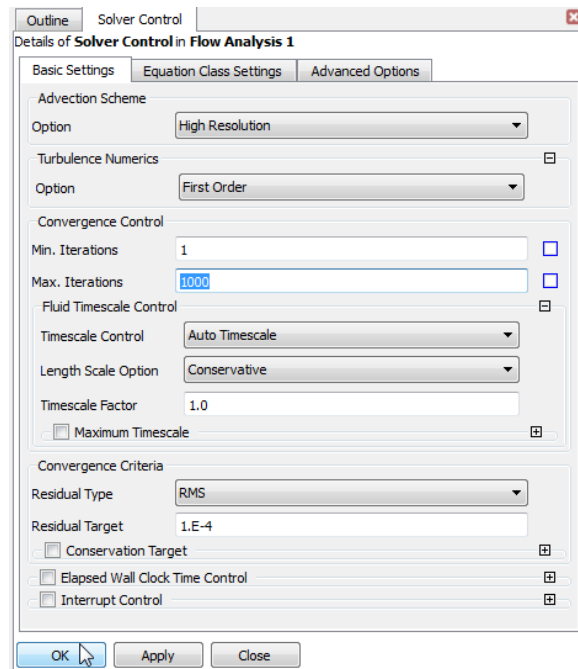


Figura 165. Configuración del control de solución (“Solver Control”) dentro del módulo CFX.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para dar por finalizada la etapa de configuración, se debe cerrar el módulo “CFX-Pre”, lo cual puede hacerse dando clic en “File”, ubicado en la zona superior izquierda de la ventana y posteriormente en “Close CFX-Pre” (Figura 166).

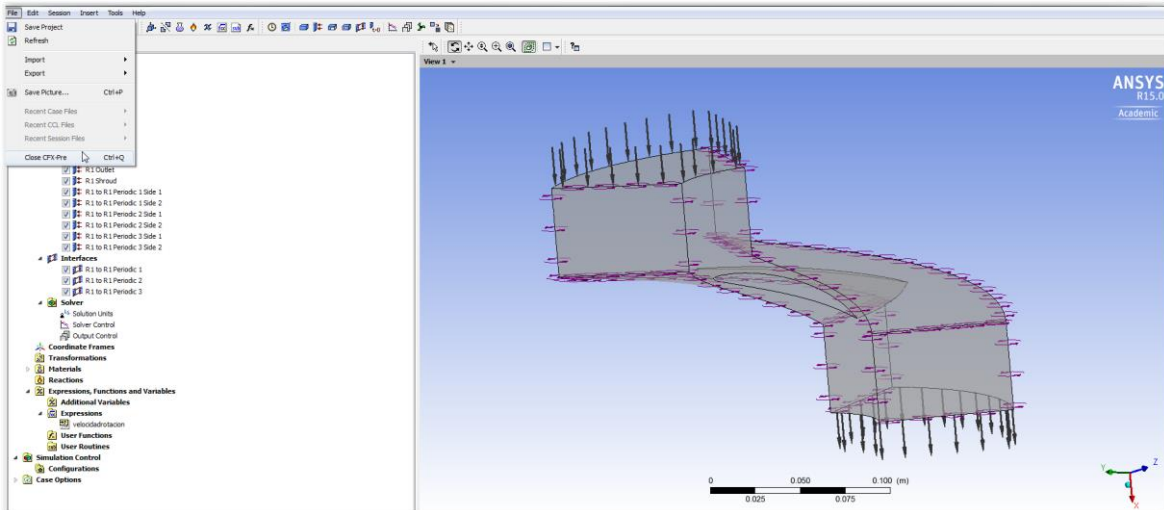


Figura 166. Una de las formas de cerrar la interface de configuración del módulo CFX.

Una vez fuera de la interface de configuración del módulo CFX, se debe establecer la técnica de procesamiento con la cual se llevará a cabo la simulación y el número de procesadores que serán puestos a disposición del mismo. Para lo cual, se da clic derecho sobre la segunda casilla del módulo “Fluid Flow (CFX)”, identificada con el nombre de “Solution” y seleccionar la opción “Edit” (Figura 167), la cual a su vez, abre una nueva ventana.

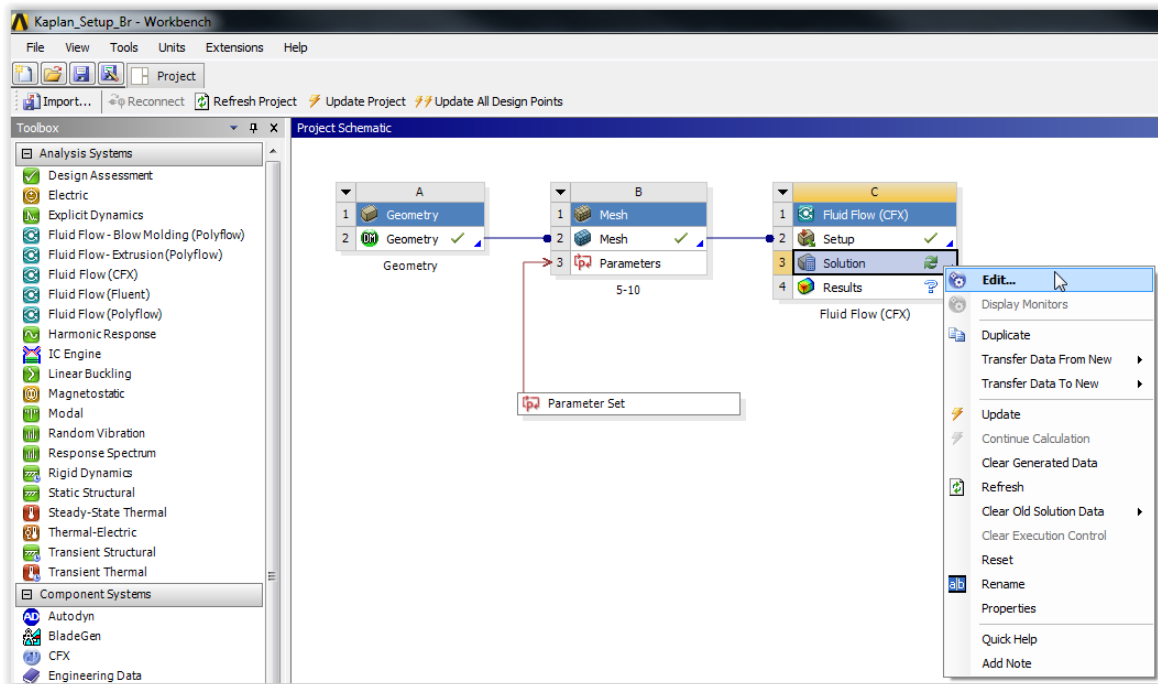


Figura 167. Forma rápida de abrir la interface de solución (Solution) del módulo CFX.

En esta ventana, se selecciona el tipo de técnica de procesamiento que se utilizará para llevar a cabo dicha simulación, la cual en este caso es la nombrada “Platform MPI Distruted Parallel”, que permite realizar el análisis de forma paralela, además de distribuir los procesos de cálculo y demás tareas que se realizan, utilizando los procesadores que se encuentren desocupados, siempre y cuando sea posible la separación de dichos datos. Teniendo en cuenta la cantidad de procesadores que serán tenidos en cuenta para la realización de la simulación (cantidad que depende tanto de los recursos computacionales que se tengan como de las licencias de Ansys con la que se cuente), contando en este caso con la disponibilidad de utilizar 12 procesadores (*Figura 168*). Y finalmente, clic en “Start Run” para iniciar el análisis.

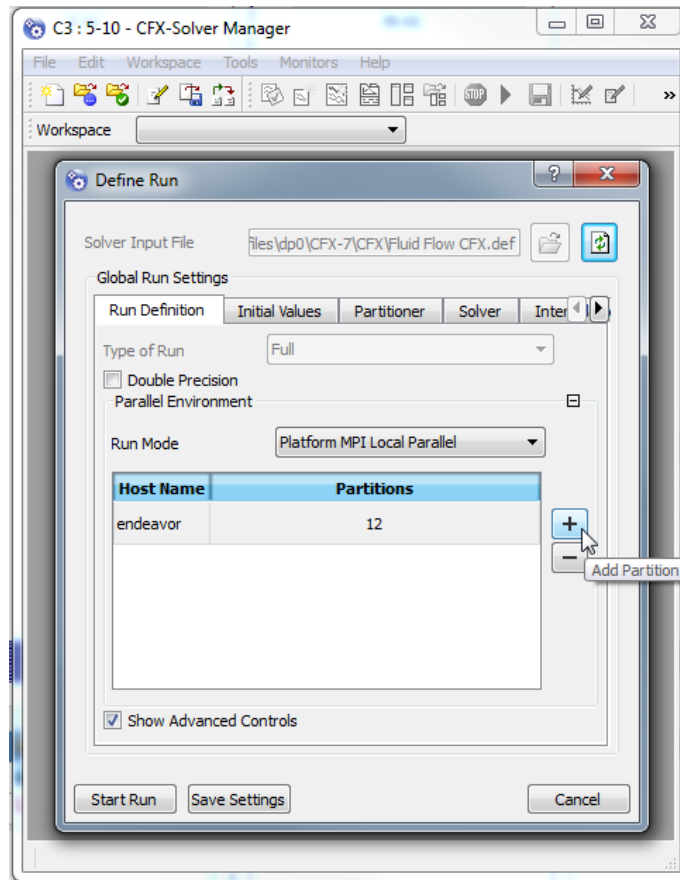


Figura 168. Configuración de la interface de solución (Solution) del módulo CFX.

3.4. Capítulo IV: Estudio de malla

Este estudio de malla se debe realizar de forma individual para cada álabe analizado (para cada grado de variación). Para lo cual se requiere tener inicialmente una simulación que haya concluido satisfactoriamente, debido a que el método que aquí se implementará, necesita un punto de partida. Este método utiliza parámetros que pueden activarse dentro de los diversos módulos de Ansys16.0® (Figura 169), con el fin de desarrollar diferentes puntos de diseño, en los cuales se establecen algunas configuraciones de la malla que permiten analizar posteriormente cambios en los valores arrojados en las diferentes variables de salida de la turbina con respecto a la cantidad de elementos de malla generados. Este método se realiza a nivel interno, por lo cual no se cuenta con visualización

gráfica del mallado y los resultados, permitiendo obtener los valores de dicho análisis, sin tener que utilizar nuevos módulos de análisis, lo cual conlleva a que el peso del archivo no se incremente como cuando se realiza un estudio de mallas de la forma tradicional, utilizando grandes árboles de análisis (Figura 170).

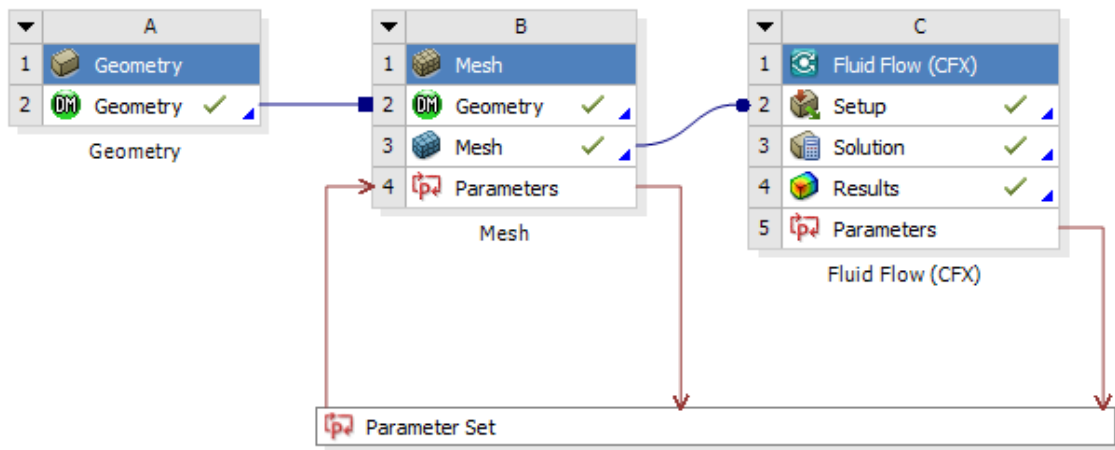


Figura 169. Visualización general de un estudio de malla realizado con el método paramétrico empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

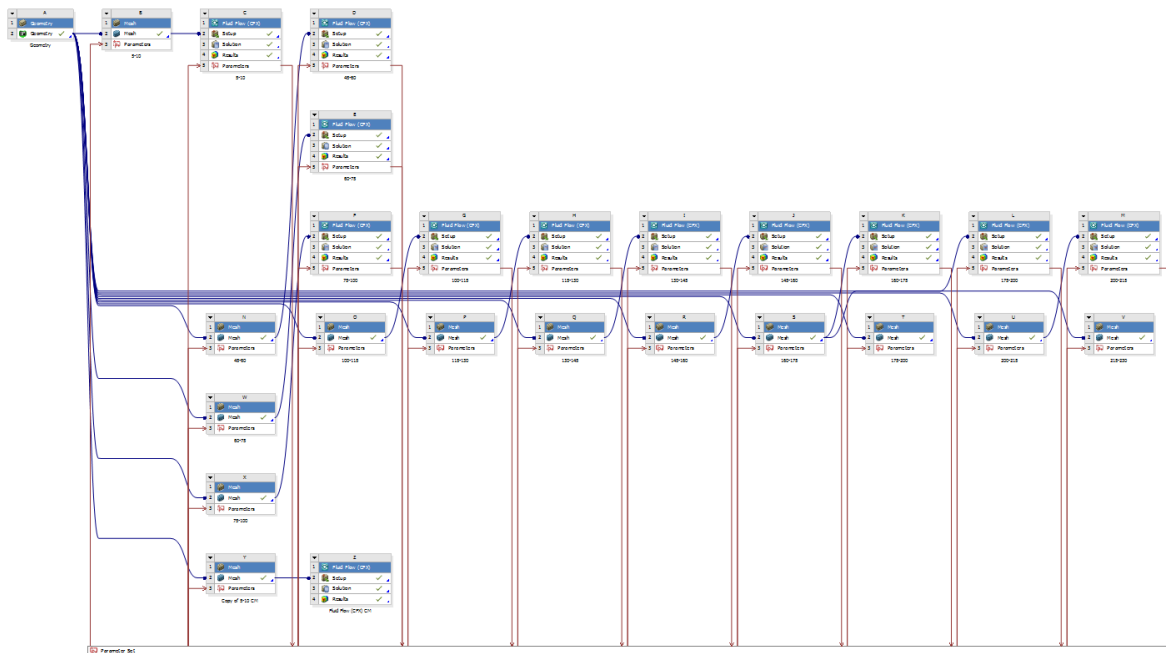


Figura 170. Visualización general de un estudio de malla realizado con el método tradicional de generación de un árbol de análisis en Ansys16.0®

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Lo primero que se hace para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño es establecer y configurar cuáles serán los parámetros tanto de entrada como de salida del sistema. Para definir los parámetros de entrada, se debe ingresar al módulo de mallado (“Mesh”) de Ansys16.0® (Figura 171).

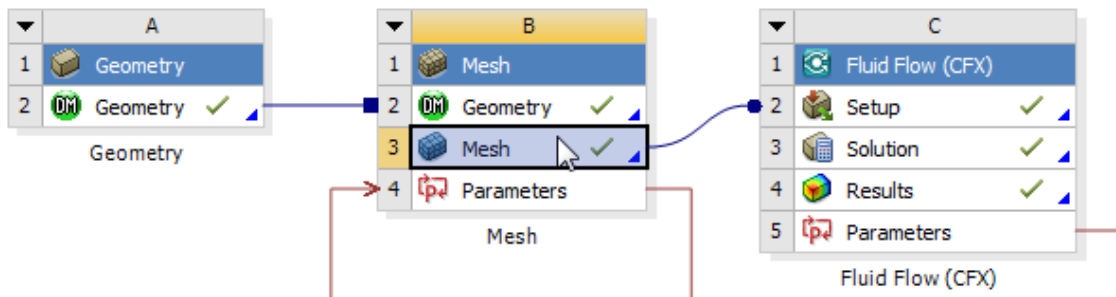


Figura 171. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Una vez dentro del módulo, se selecciona de la ventana “Outline” la herramienta de mallado “Mesh” (Figura 172), con lo cual se activa en la zona inferior izquierda la ventana “Details of Mesh” donde se encuentran las características correspondientes a la malla; en ésta se debe desplegar la pestaña “Defaults” y se da clic en la casilla que se encuentra en blanco al lado izquierdo de “Relevancia” para que aparezca la letra “P” (Figura 173) que significa que dicho valor ha sido establecido como un parámetro.

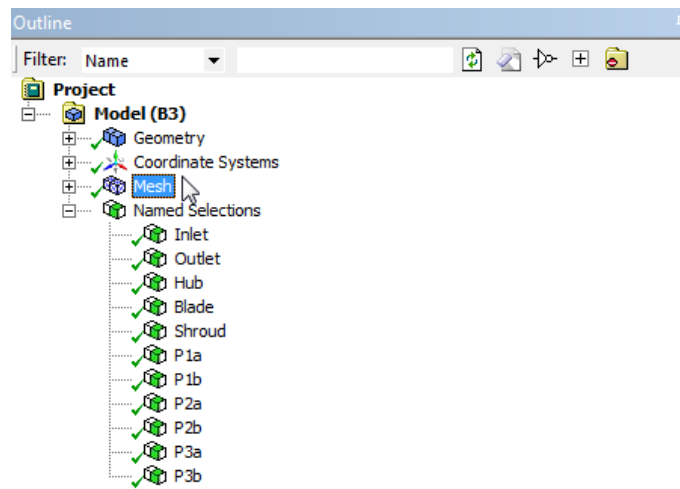


Figura 172. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

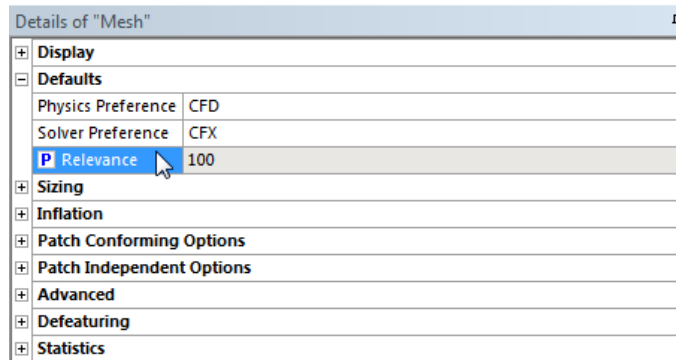


Figura 173. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Posteriormente se debe desplegar la pestaña “Sizing”, en la cual se establecen como parámetros “Min Size”, “Max Face Size” y “Max Size”, como se mencionó anteriormente dando clic sobre la casilla localizada al lado izquierdo de las mismas hasta que aparezca la letra “P” (Figura 174).

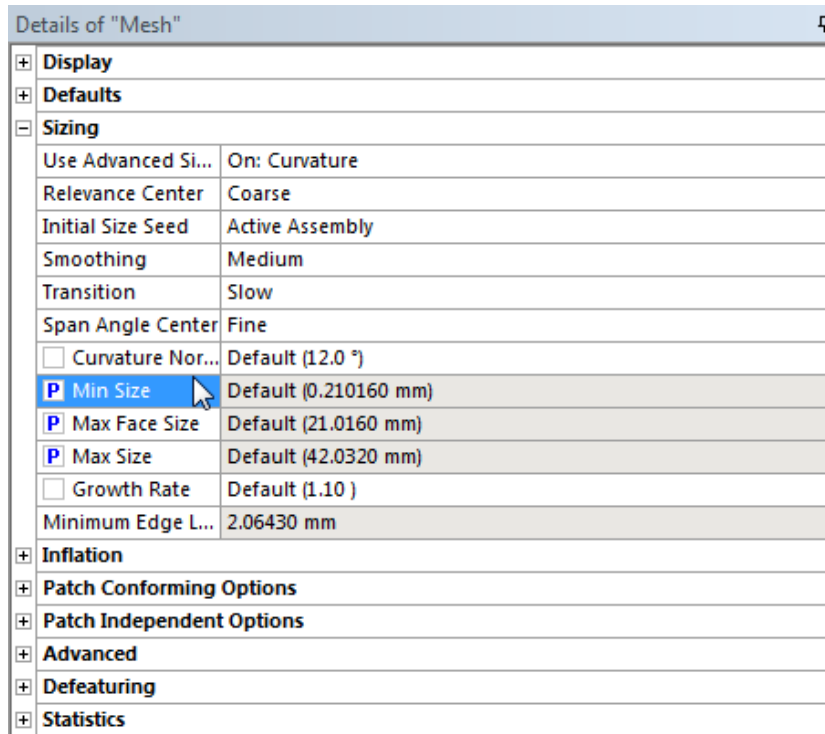
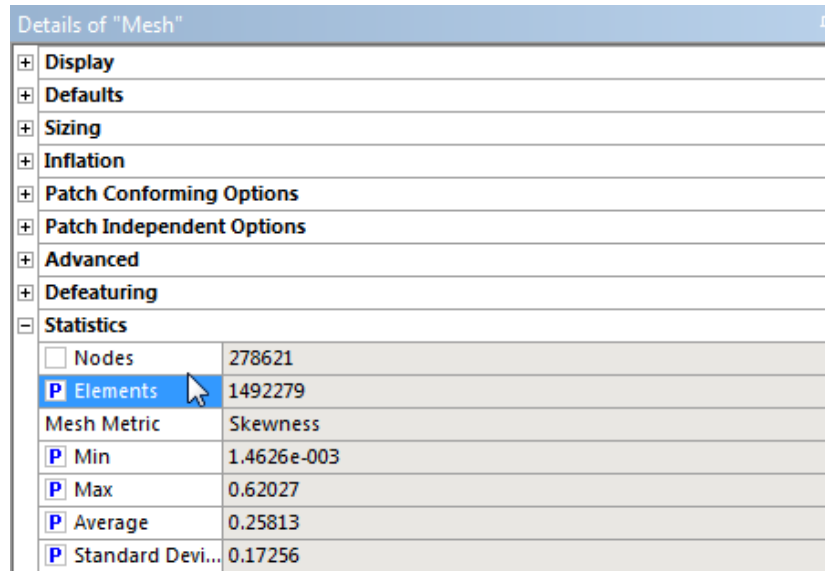


Figura 174. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Luego se establecen algunos parámetros de salida que se encuentran en la misma ventana “Details of Mesh”, los cuales se encuentran al desplegar la pestaña “Statistics” y se da clic en las casillas correspondientes a “Elements”, “Min”, “Max”, “Average” y “Standard Deviation” ubicadas al lado izquierdo de las mismas para que aparezca la letra “P” (Figura 175) y finalmente se cierra el módulo de mallado.



Details of "Mesh"	
⊕	Display
⊕	Defaults
⊕	Sizing
⊕	Inflation
⊕	Patch Conforming Options
⊕	Patch Independent Options
⊕	Advanced
⊕	Defeaturing
⊖	Statistics
<input type="checkbox"/>	Nodes 278621
<input checked="" type="checkbox"/>	Elements 1492279
	Mesh Metric Skewness
<input checked="" type="checkbox"/>	Min 1.4626e-003
<input checked="" type="checkbox"/>	Max 0.62027
<input checked="" type="checkbox"/>	Average 0.25813
<input checked="" type="checkbox"/>	Standard Devi... 0.17256

Figura 175. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Continuando con la definición de parámetros se debe ingresar, dando doble clic, en la sección “Results” del módulo de análisis “Fluid Flow (CFX)” (Figura 176), localizado en la ventana principal de Ansys16.0®.

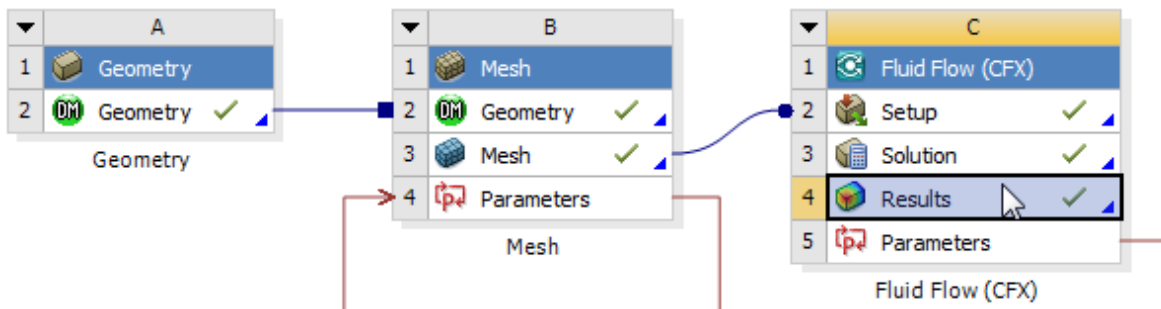


Figura 176. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Una vez dentro de la sección de resultados de CFX, se debe seleccionar la pestaña “Expressions” (Figura 177), en la cual se encuentran algunas de las expresiones resultantes del análisis. En esta ventana se seleccionarán algunos de los parámetros de salida de interés según el estudio que se esté realizando, comenzando en este caso con la expresión “Accumulated Time Step”, haciendo clic derecho sobre ésta y seleccionando la opción “Use as Workbench Output Parameter” (Figura 178) para que se establezca como uno de los parámetros de salida que podrán visualizarse posteriormente.

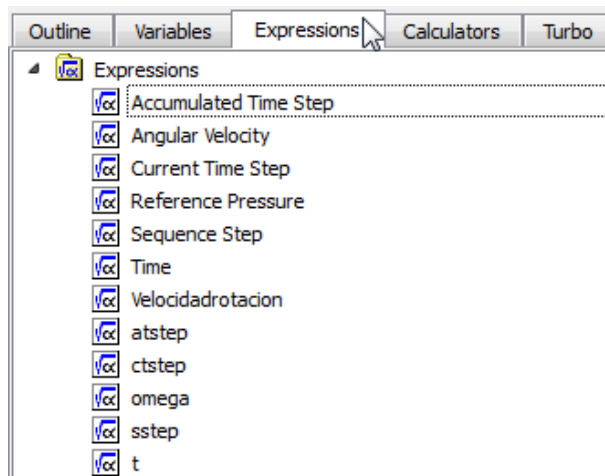


Figura 177. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

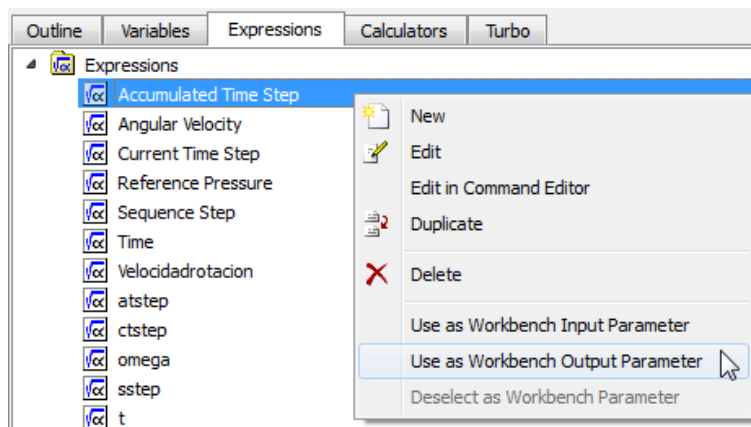


Figura 178. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Un segundo parámetro es “*Current Time Step*”, el cual se establece como parámetro de salida dando nuevamente clic derecho sobre la expresión y seleccionando la opción “Use as Workbench Output Parameter” (Figura 179).

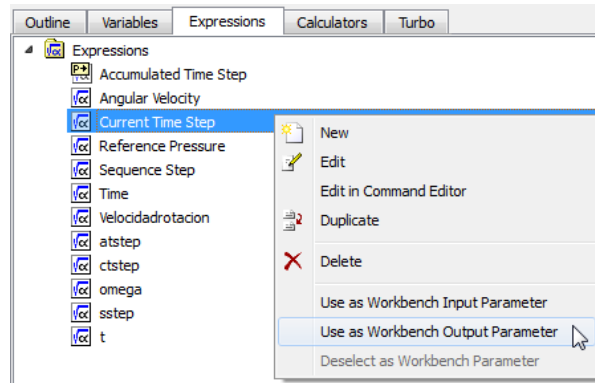


Figura 179. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Posteriormente se generan nuevas expresiones de interés en el análisis del comportamiento de turbinas como lo son los torques en el eje X, Y y Z, además de la velocidad en el área de salida y la velocidad de la masa a la salida. Para lo cual se da clic derecho sobre la zona limpia de la ventana “Expressions” y se selecciona la opción “New” (Figura 180) que a su vez abre un cuadro de diálogo en el que se escribe el nombre de la expresión de interés que se desea crear, en este caso se le asigna el nombre de “TorqueX” a la expresión y se da clic en “OK” para generarla (Figura 181), lo cual activa en la zona inferior de la pantalla una ventana denominada “Details of TorqueX” en la que se debe establecer la fórmula que registrará la expresión deseada, que para este caso al tratarse del torque en el eje X, se desarrolla dando clic derecho sobre el espacio en blanco de dicha ventana, y en el cuadro de opciones que se activa seleccionar secuencialmente “Functions”, “CFD-Post” y “torque_x” (Figura 182), además de definir la zona en la cual se quiere conocer dicho torque que en este caso es en el álabe de la turbina, por lo cual se da clic derecho al final de la expresión parcialmente establecida y se selecciona de manera secuencial “Locations” y “R1 Blade” (Figura 183), dando clic en “Apply” para que el software genere la expresión (Figura 184). Finalmente se realiza el procedimiento planteado anteriormente para establecer la nueva expresión como parámetro de salida (Figura 185).

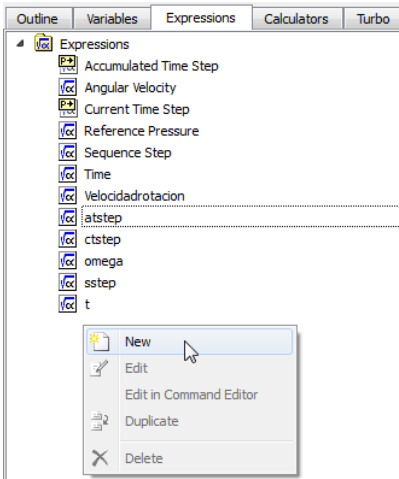


Figura 180. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

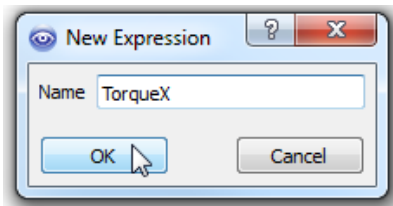


Figura 181. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

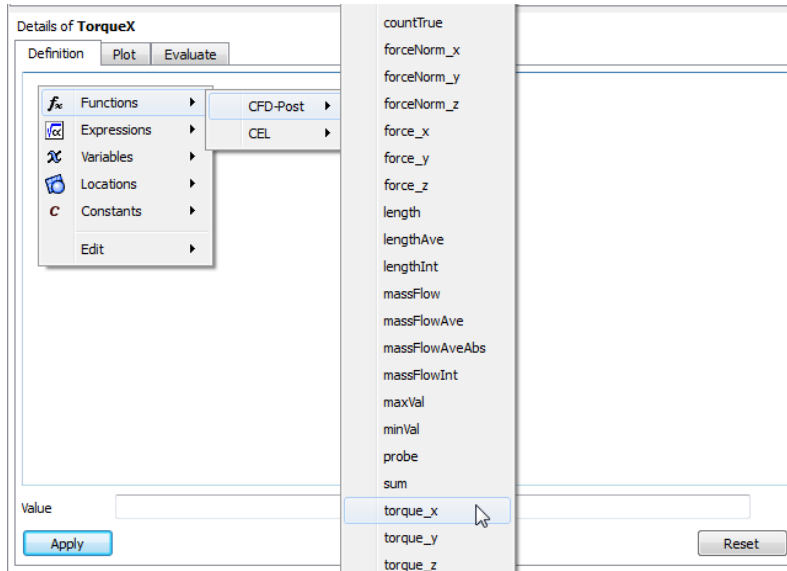


Figura 182. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

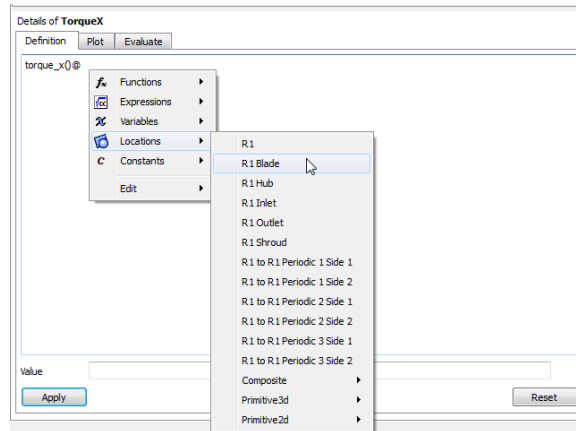


Figura 183. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

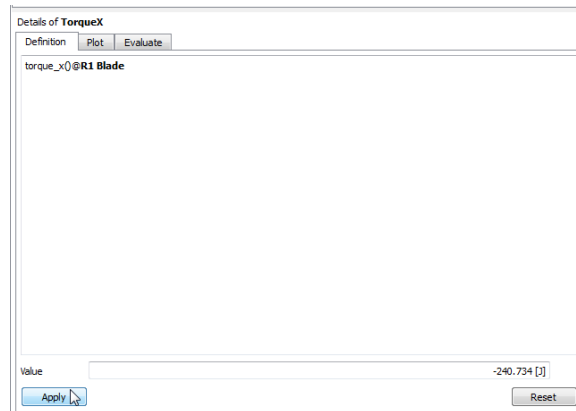


Figura 184. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

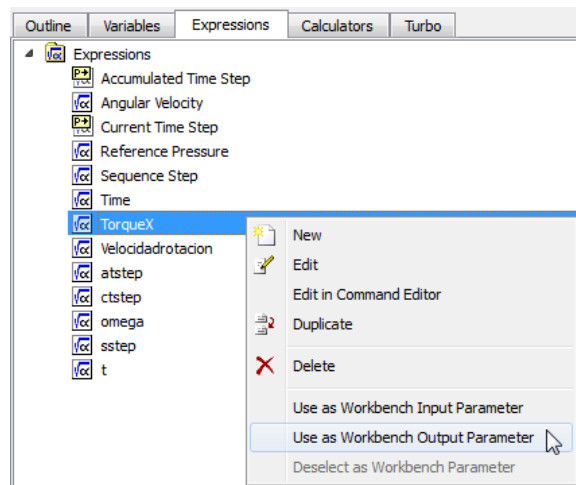


Figura 185. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para la calcular el torque en el eje Y, se realiza el procedimiento anterior, creando inicialmente una expresión denominada en este caso como “TorqueY” (Figura 186), y se ejecutan en la ventana “Details of TorqueY” los mismos pasos utilizados para generar la expresión anterior (“TorqueX”), dando clic derecho sobre el espacio en blanco de dicha ventana y seleccionando secuencialmente “Functions”, “CFD-Post” y “torque_y” (Figura 187), y definir la zona de interés que en este caso es nuevamente el álabe de la turbina, por lo cual se da clic derecho al final de la expresión parcialmente establecida y se selecciona de manera secuencial “Locations” y “R1 Blade” (Figura 188), dando clic en “Apply” para que el software genere la expresión (Figura 189) y nuevamente se realiza el procedimiento planteado anteriormente para establecer la nueva expresión como parámetro de salida (Figura 190).

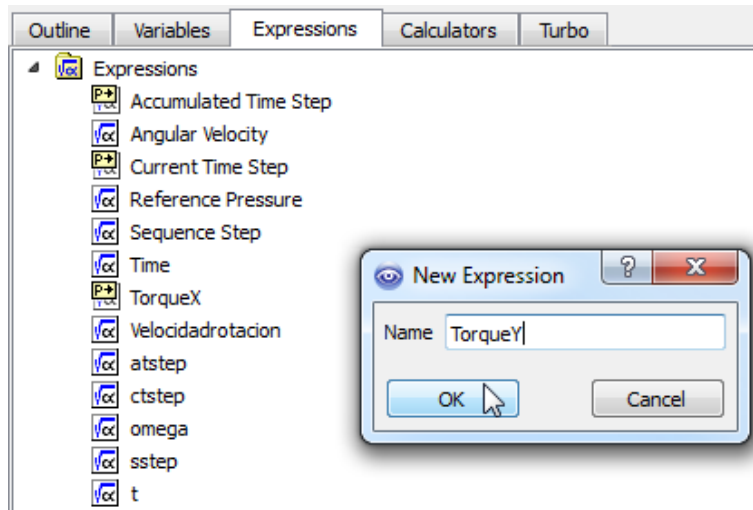


Figura 186. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

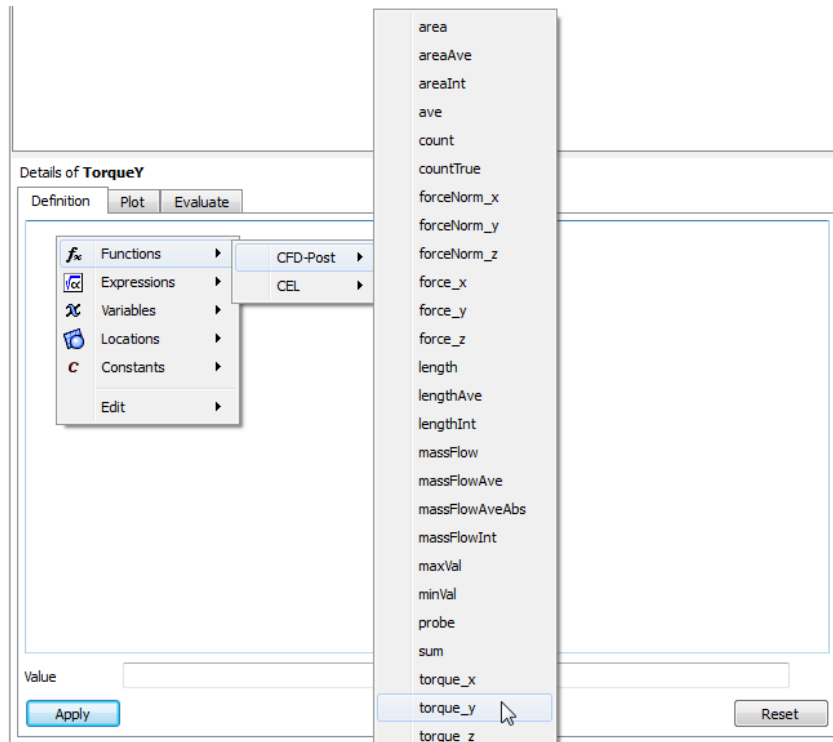


Figura 187. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

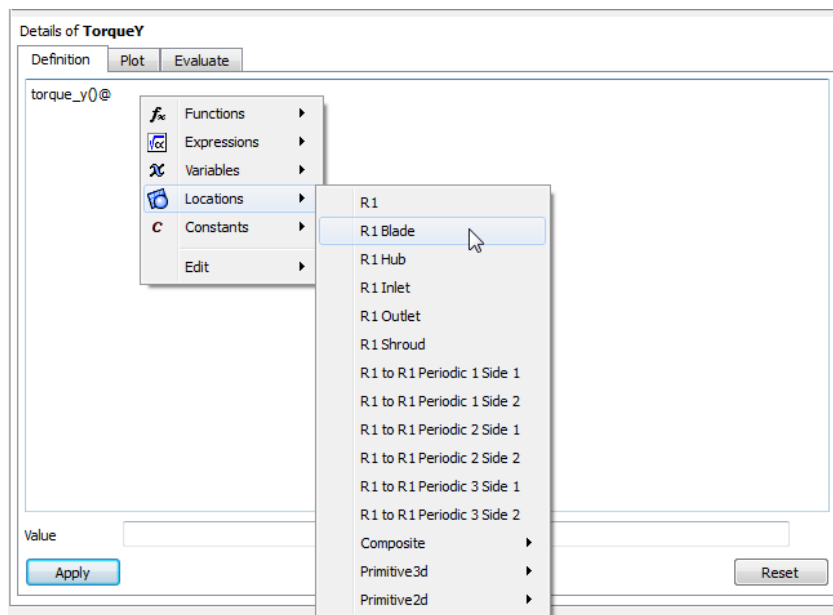


Figura 188. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

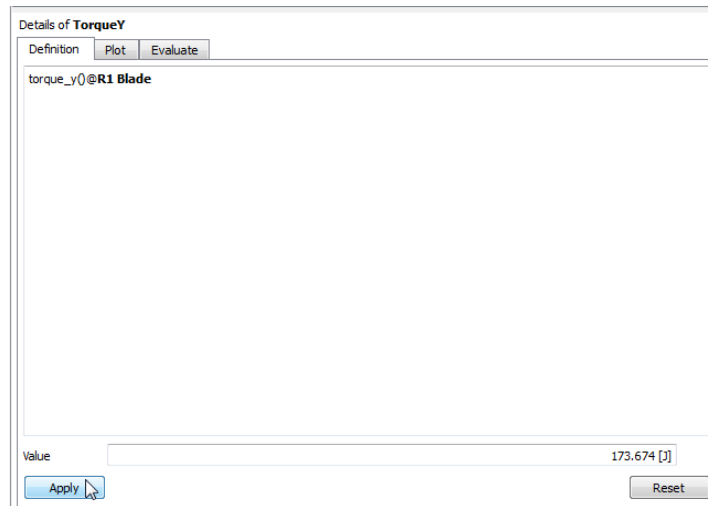


Figura 189. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

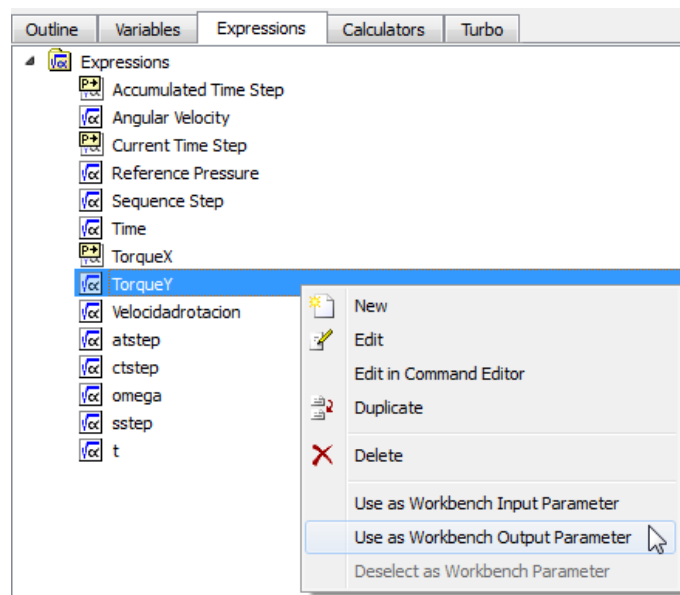


Figura 190. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Para la calcular el torque en el eje Z, se realiza exactamente el procedimiento realizado en los dos casos anteriores, nombrando la expresión como “TorqueZ” (Figura 191) y utilizando la función “torque_z” (Figura 192) en la ventana “Details of TorqueZ”, definiendo como zona de interés nuevamente el álabe de la turbina (Figura 193), dando clic en “Apply” para que el software tome los cambios (Figura 194) y realizar el procedimiento planteado anteriormente para establecer la nueva expresión como parámetro de salida (Figura 195).

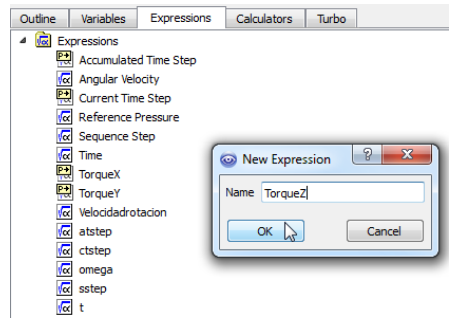


Figura 191. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

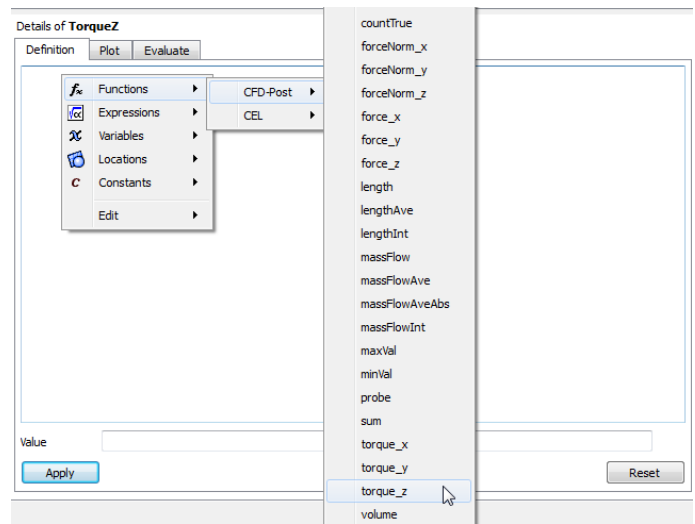


Figura 192. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

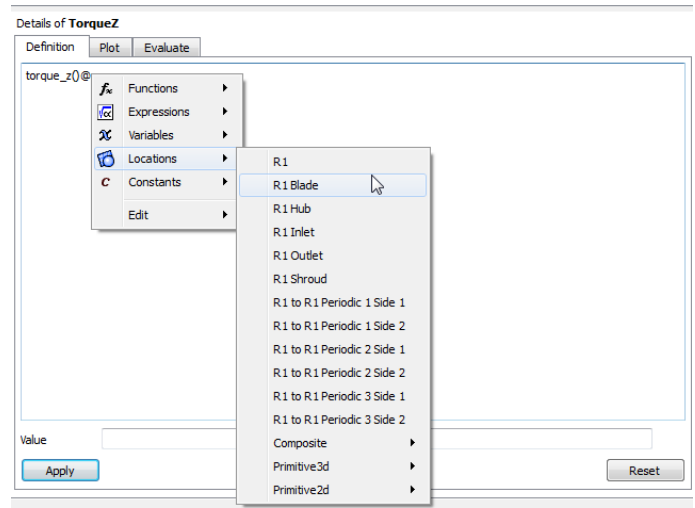


Figura 193. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

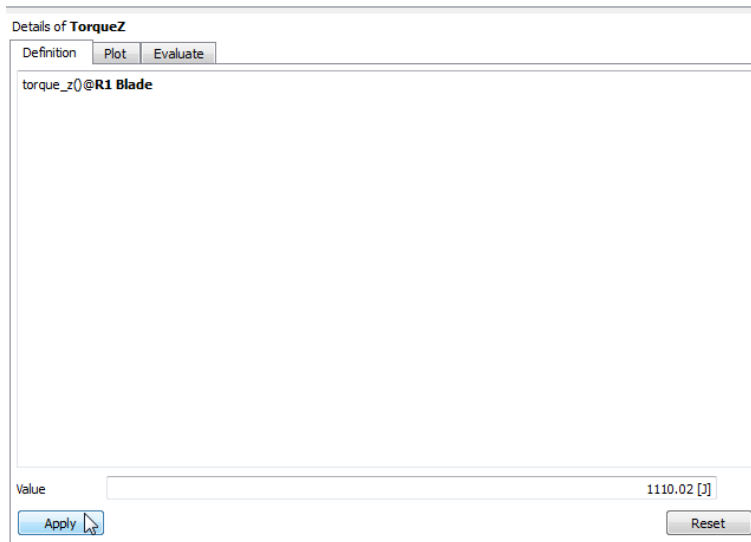


Figura 194. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

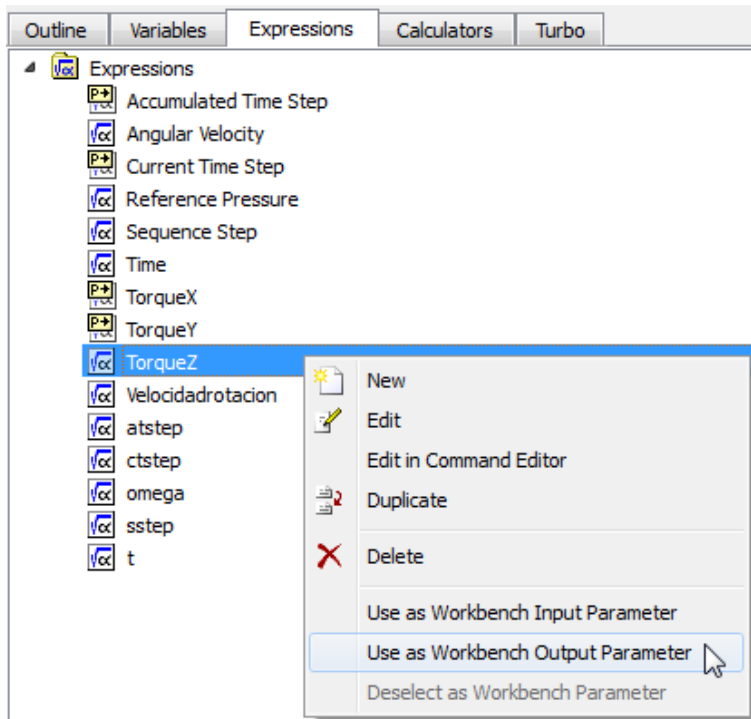


Figura 195. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Continuando con la creación de los parámetros de salida, se procede a generar las dos expresiones con énfasis en la salida de la turbina. La primera de ellas denominada “Velocidadareasalida” (Figura 196), para la cual se da clic derecho en el espacio en blanco de la ventana “Details of Velocidadareasalida” y seleccionando secuencialmente “Functions”, “CFD-Post” y “areaAve” (Figura 197), luego clic derecho dentro del paréntesis de la función generada y seleccionar “Variables” y seleccionar “Velocity” (Figura 198), y por último definir la zona de interés que en este caso es la salida de la turbina, por lo cual se da clic derecho al final de la expresión parcialmente establecida y se selecciona de manera secuencial “Locations” y “R1 Outlet” (Figura 199), dando clic en “Apply” para que el software genere la expresión (Figura 200) y nuevamente se realiza el procedimiento planteado anteriormente para establecer la nueva expresión como parámetro de salida (Figura 201).

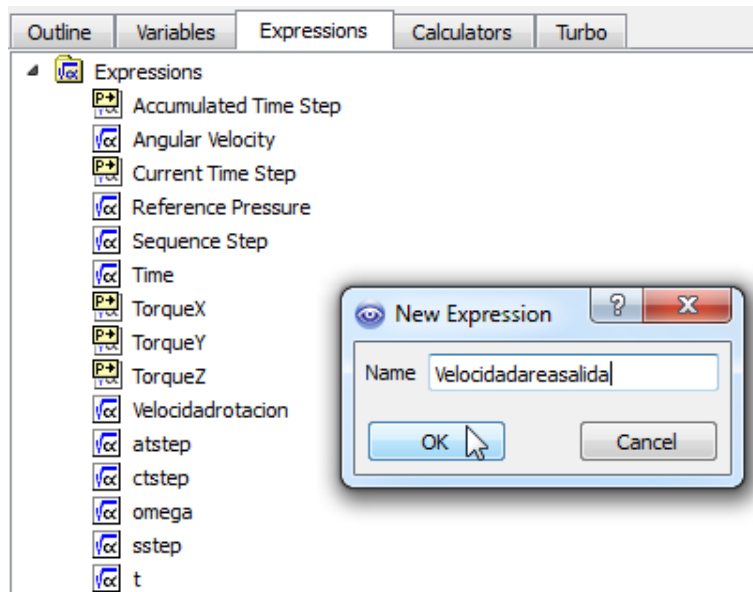


Figura 196. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

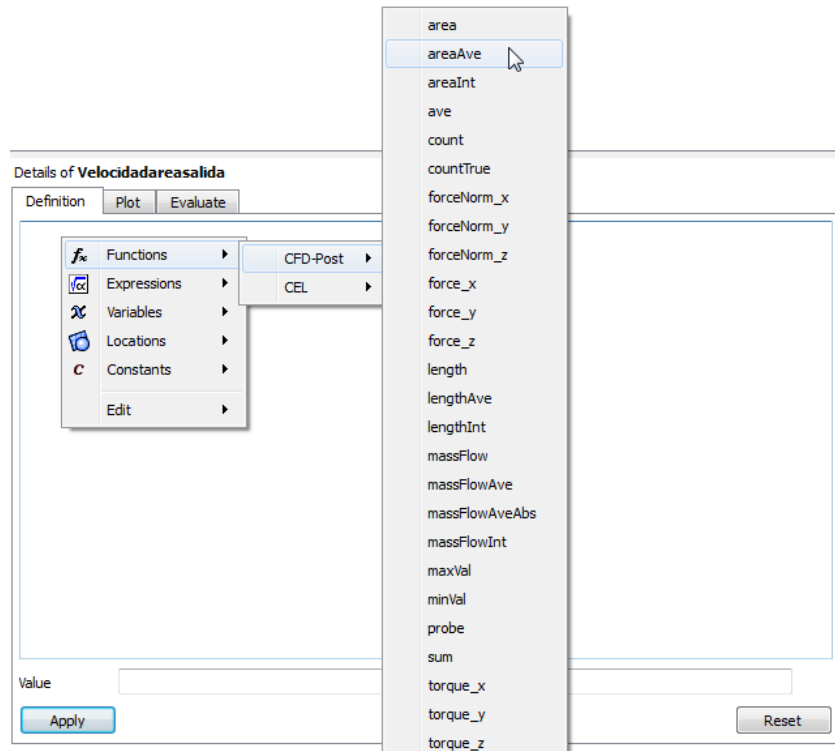


Figura 197. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

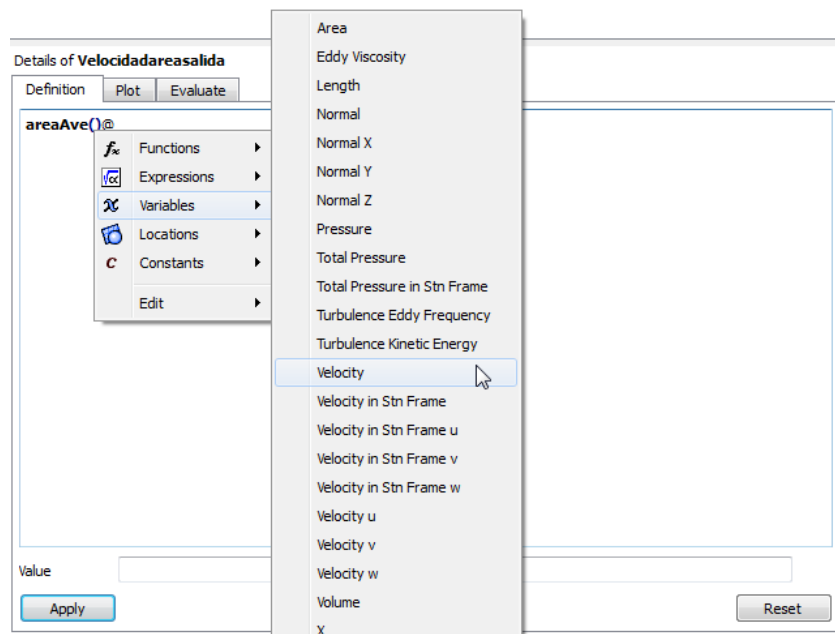


Figura 198. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

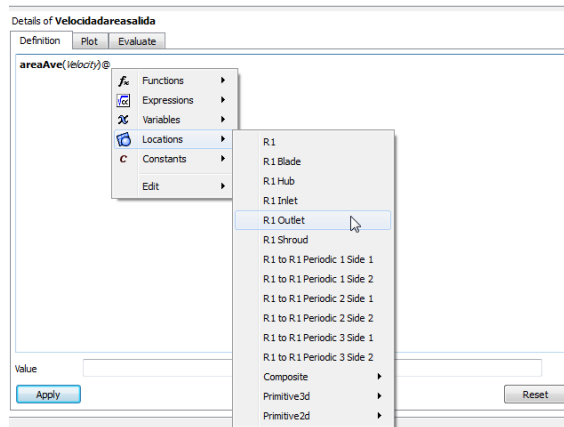


Figura 199. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

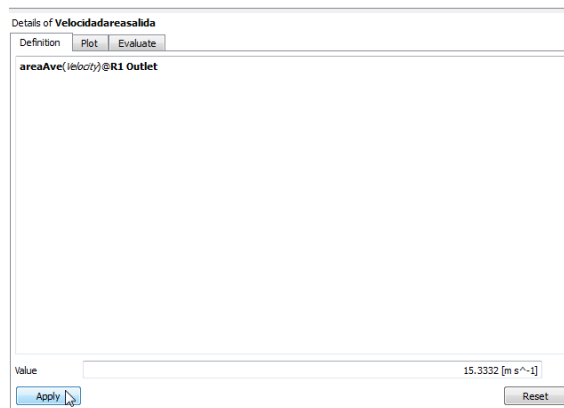


Figura 200. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

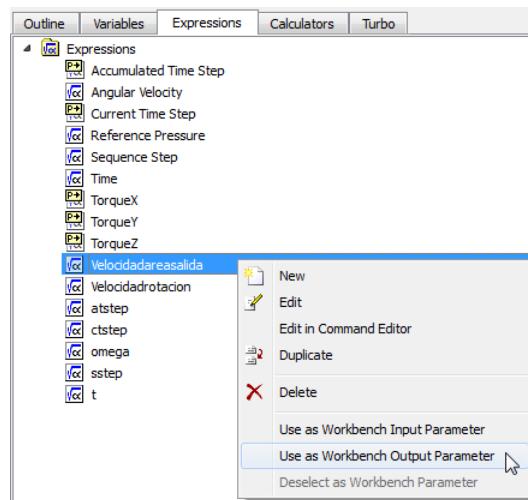


Figura 201. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para la segunda de ellas, nombrada como “*Velocidadmasasalida*” (Figura 202), se da clic derecho en el espacio en blanco de la ventana “Details of *Velocidadmasasalida*” y se selecciona secuencialmente “Functions”, “CFD-Post” y “*massFlowAve*” (Figura 203), luego clic derecho dentro del paréntesis de la función generada y elegir “Variables” y escoger “*Velocity*” (Figura 204), y por último definir la zona de interés que en este caso es la salida de la turbina, dando clic derecho al final de la expresión parcialmente establecida y seleccionar de forma secuencial “Locations” y “R1 Outlet” (Figura 205), dando clic en “Apply” para que el software genere la expresión (Figura 206) y nuevamente se realiza el procedimiento planteado anteriormente para establecer la nueva expresión como parámetro de salida. Con lo cual se finaliza el proceso de definición de parámetros y se procede a la realización del estudio de malla mediante la generación de puntos de diseño.

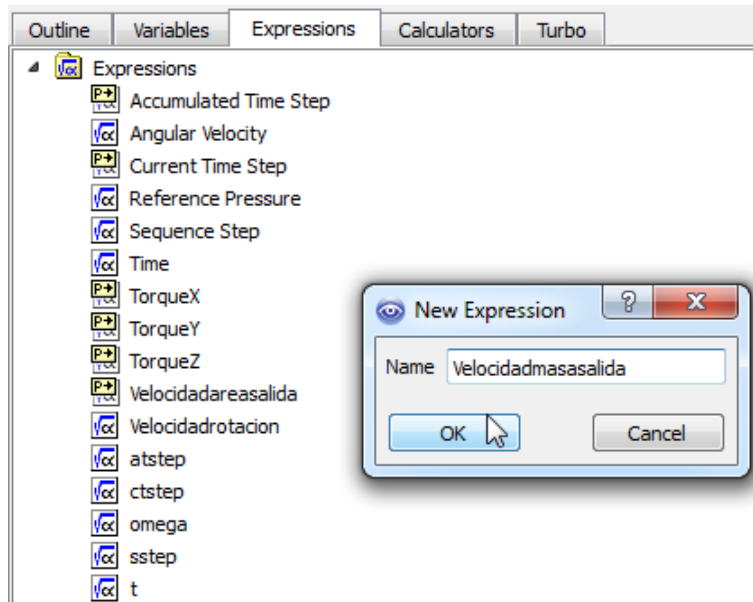


Figura 202. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

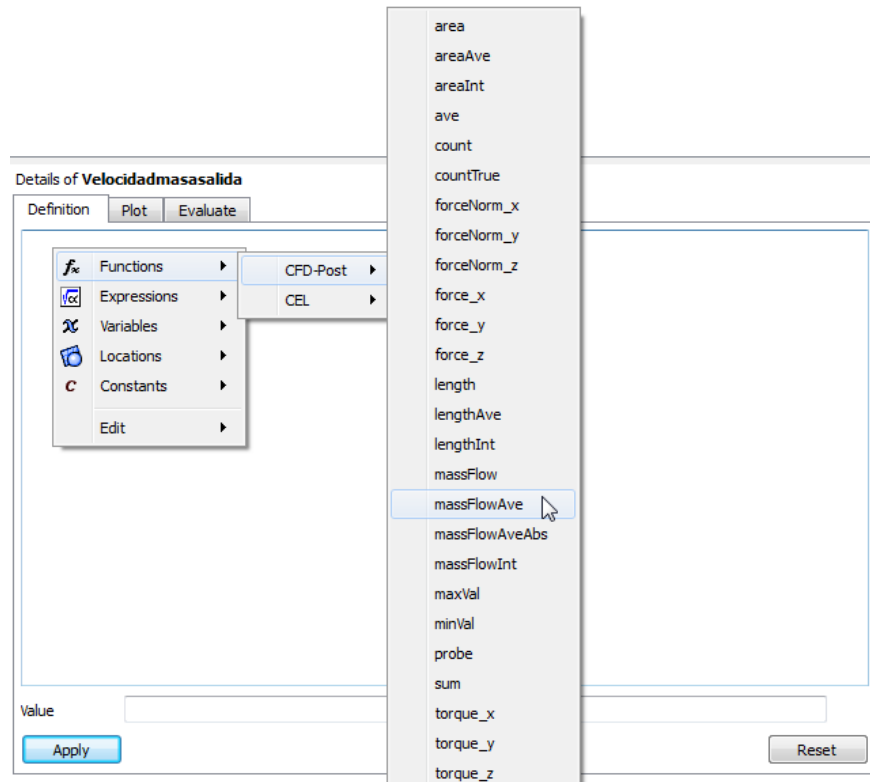


Figura 203. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

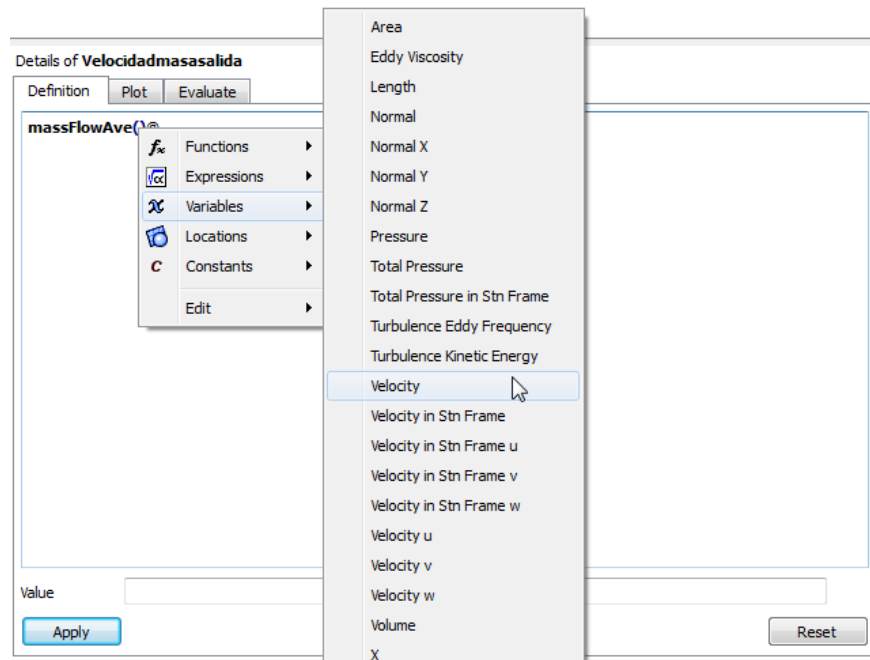


Figura 204. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

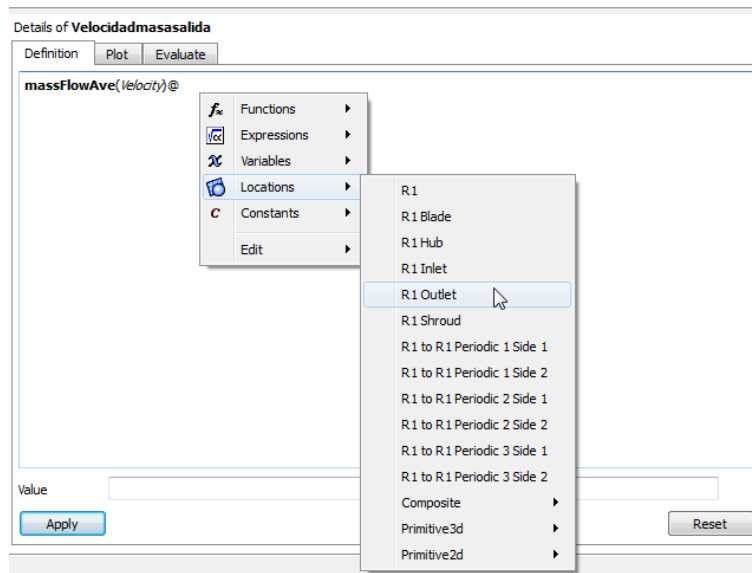


Figura 205. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®



Figura 206. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Para realizar el estudio de malla se debe ingresar a la sección “Parameter Set” ubicada en la zona inferior de los módulos de mallado (“Mesh”) y análisis (“CFX”), dando doble clic sobre la misma (Figura 207). Sección dentro de la cual, se encuentran reunidos todos los parámetros generados anteriormente (Figura 208) en la zona central izquierda de la ventana “Parameter Set” en la ventana “Outline of All Parameters”.

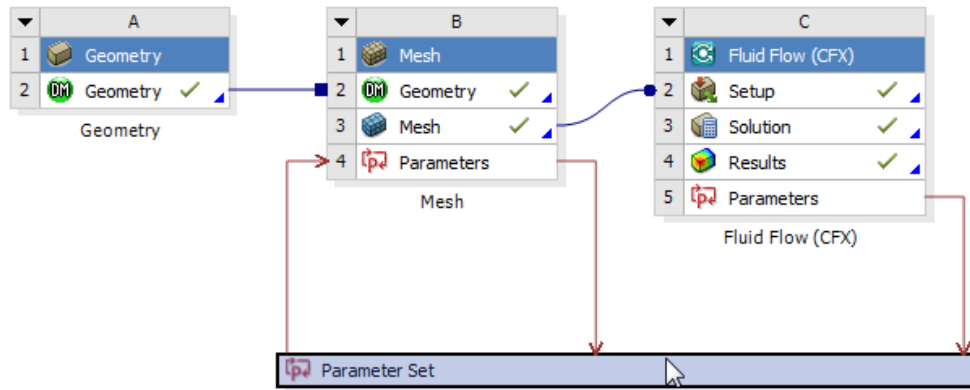


Figura 207. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Mesh (B1)			
4	P1	Mesh Relevance	100	
5	P2	Mesh Min Size	0	mm
6	P3	Mesh Max Face Size	0	mm
7	P4	Mesh Max Size	0	mm
*	New input parameter	New name	New expression	
9	Output Parameters			
10	Mesh (B1)			
11	P5	Mesh Elements	1.4923E+06	
12	P6	Mesh Min	0.0014626	
13	P7	Mesh Max	0.62027	
14	P8	Mesh Average	0.25813	
15	P9	Mesh Standard Deviation	0.17256	
16	Fluid Flow (CFX) (C1)			
17	P10	Accumulated Time Step	193	
18	P11	Current Time Step	193	
19	P12	TorqueX	-240.73	J
20	P13	TorqueY	173.67	J
21	P14	TorqueZ	1110	J
22	P15	Velocidadareasalida	15.333	m s ⁻¹
*	New output parameter		New expression	
24	Charts			

Figura 208. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

En la zona derecha de la ventana “Parameter Set” se encuentra la tabla de puntos de diseño (“Table of Design Points”) (Figura 209), en la cual se le asignan valores a los parámetros de entrada establecidos, con el fin de modificar las características y el tamaño de la malla.

Table of Design Points								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P1 - Mesh Relevance	P2 - Mesh Min Size	P3 - Mesh Max Face Size	P4 - Mesh Max Size	P5 - Mesh Elements	P6 - Mesh Min	P7 - Mesh
2	Units		mm	mm	mm			
3	DP 0 (Current)	100	0	0	0	1.4923E+06	0.0014626	0.62027
*								

Figura 209. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

En este caso, se estableció inicialmente modificar sólo la relevancia de la malla con valores de diez en diez, contando con los valores de relevancia desde -100 hasta 100 y posteriormente se estableció un valor de relevancia máxima (100) y se realizaron modificaciones (de forma aleatoria) con valores relativamente bajos para los parámetros “Min Size”, “Max Face Size” y “Max Size”, con el fin de obtener mallas de mayor densidad (mayor cantidad de elementos) (Figura 210). Posteriormente, deben seleccionarse todas aquellas casillas que requieran actualización (aquellas que presenten el símbolo de un rayo de color amarillo), dar clic derecho sobre una de las casillas seleccionadas y escoger la opción “Update Selected Design Points” (Figura 211), con lo cual el programa comenzará a realizar el respectivo análisis sólo sobre aquellos puntos de interés, sin repetir los que ya cuenten con resultados.

Table of Design Points								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P1 - Mesh Relevance	P2 - Mesh Min Size	P3 - Mesh Max Face Size	P4 - Mesh Max Size	P5 - Mesh Elements	P6 - Mesh Min	P7 - Mesh
2	Units		mm	mm	mm			
3	DP 0 (Current)	100	0	0	0	1.4923E+06	0.0014626	0.62027
4	DP 1	-100	0	0	0	⚡	⚡	⚡
5	DP 2	-90	0	0	0	⚡	⚡	⚡
6	DP 3	-80	0	0	0	⚡	⚡	⚡
7	DP 4	-70	0	0	0	⚡	⚡	⚡
8	DP 5	-60	0	0	0	⚡	⚡	⚡
9	DP 6	-50	0	0	0	⚡	⚡	⚡
10	DP 7	-40	0	0	0	⚡	⚡	⚡
11	DP 8	-30	0	0	0	⚡	⚡	⚡
12	DP 9	-20	0	0	0	⚡	⚡	⚡
13	DP 10	-10	0	0	0	⚡	⚡	⚡
14	DP 11	0	0	0	0	⚡	⚡	⚡
15	DP 12	10	0	0	0	⚡	⚡	⚡
16	DP 13	20	0	0	0	⚡	⚡	⚡
17	DP 14	30	0	0	0	⚡	⚡	⚡
18	DP 15	40	0	0	0	⚡	⚡	⚡
19	DP 16	50	0	0	0	⚡	⚡	⚡
20	DP 17	60	0	0	0	⚡	⚡	⚡
21	DP 18	70	0	0	0	⚡	⚡	⚡
22	DP 19	80	0	0	0	⚡	⚡	⚡
23	DP 20	90	0	0	0	⚡	⚡	⚡
24	DP 21	100	10	20	30	⚡	⚡	⚡
25	DP 22	100	5	10	20	⚡	⚡	⚡
26	DP 23	100	2.5	5	10	⚡	⚡	⚡
27	DP 24	100	1.5	3	6	⚡	⚡	⚡
28	DP 25	100	1	2	4	⚡	⚡	⚡
29	DP 26	100	1.5	2.5	4	⚡	⚡	⚡
30	DP 27	100	0.5	1	2	⚡	⚡	⚡
31	DP 28	100	1	1.5	3	⚡	⚡	⚡

Figura 210. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Table of Design Points								
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Name	P1 - Mesh Relevance	P2 - Mesh Min Size	P3 - Mesh Max Face Size	P4 - Mesh Max Size	P5 - Mesh Elements	P6 - Mesh Min	P7 - Mesh
	Units		mm	mm	mm			
1	DP 0 (Current)	100	0	0	0	1.4923E+06	0.0014626	0.62027
4	DP 1	-100	0	0	0	⚡	⚡	⚡
5	DP 2	-90	0	0	0	⚡	⚡	⚡
6	DP 3	-80	0	0	0	⚡	⚡	⚡
7	DP 4	-70	0	0	0	⚡	⚡	⚡
8	DP 5	-60	0	0	0	⚡	⚡	⚡
9	DP 6	-50	0	0	0	⚡	⚡	⚡
10	DP 7	-40			0	⚡	⚡	⚡
11	DP 8	-30			0	⚡	⚡	⚡
12	DP 9	-20			0	⚡	⚡	⚡
13	DP 10	-10			0	⚡	⚡	⚡
14	DP 11	0			0	⚡	⚡	⚡
15	DP 12	10			0	⚡	⚡	⚡
16	DP 13	20			0	⚡	⚡	⚡
17	DP 14	30			0	⚡	⚡	⚡
18	DP 15	40			0	⚡	⚡	⚡
19	DP 16	50			0	⚡	⚡	⚡
20	DP 17	60			0	⚡	⚡	⚡
21	DP 18	70			0	⚡	⚡	⚡
22	DP 19	80	0	0	0	⚡	⚡	⚡
23	DP 20	90	0	0	0	⚡	⚡	⚡
24	DP 21	100	10	20	30	⚡	⚡	⚡
25	DP 22	100	5	10	20	⚡	⚡	⚡
26	DP 23	100	2.5	5	10	⚡	⚡	⚡
27	DP 24	100	1.5	3	6	⚡	⚡	⚡
28	DP 25	100	1	2	4	⚡	⚡	⚡
29	DP 26	100	1.5	2.5	4	⚡	⚡	⚡
30	DP 27	100	0.5	1	2	⚡	⚡	⚡
31	DP 28	100	1	1.5	3	⚡	⚡	⚡

Figura 211. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Tras terminar todo el proceso de simulación, el programa llena las casillas de la tabla con los valores arrojados según la configuración establecida para la malla. Contando con estos resultados, se procede a analizar la convergencia de los mismos, empleando para este caso los valores arrojados en la casilla “Mesh Elements” (Figura 212) y los de la casilla “TorqueX” (Figura 213), para realizar un versus entre ellos y poder determinar el comportamiento de la malla. Los demás resultados obtenidos en la tabla de puntos de diseño también pueden emplearse para realizar el análisis del comportamiento de la malla, siendo esto un factor de libre escogencia para la persona que requiera realizar el análisis de malla.

Los símbolos de rayos amarillos con una X de color rojo que se presentan en la Figura 213, en la fila 30 de la tabla de puntos de diseño, son valores que por alguna razón no pudieron ser solucionados por el software, por lo cual se tiene la opción de darles nuevamente “Update Selected Design Points” o simplemente no tenerse en cuenta para el estudio.

Table of Design Points							
	A	B	C	D	E	F	G
	Name	P1 - Mesh Relevance	P2 - Mesh Min Size	P3 - Mesh Max Face Size	P4 - Mesh Max Size	P5 - Mesh Elements	P6 - Mesh Min
	Units		mm	mm	mm		
3	DP 0 (Current)	100	0	0	0	1.4923E+06	0.0014626
4	DP 1	-100	0	0	0	1.8644E+05	0.0037988
5	DP 2	-90	0	0	0	2.0257E+05	0.0045307
6	DP 3	-80	0	0	0	2.2468E+05	0.0033494
7	DP 4	-70	0	0	0	2.7057E+05	0.00097979
8	DP 5	-60	0	0	0	3.0566E+05	0.0010513
9	DP 6	-50	0	0	0	4.1751E+05	0.0020833
10	DP 7	-40	0	0	0	4.4454E+05	0.00074223
11	DP 8	-30	0	0	0	4.6344E+05	0.0012091
12	DP 9	-20	0	0	0	5.1455E+05	0.0023463
13	DP 10	-10	0	0	0	5.7466E+05	0.0012391
14	DP 11	0	0	0	0	6.4644E+05	0.00080036
15	DP 12	10	0	0	0	6.9175E+05	0.0024896
16	DP 13	20	0	0	0	7.3913E+05	0.00062582
17	DP 14	30	0	0	0	7.8829E+05	0.0015724
18	DP 15	40	0	0	0	8.3996E+05	0.0012634
19	DP 16	50	0	0	0	8.9072E+05	0.00077042
20	DP 17	60	0	0	0	8.4282E+05	0.001421
21	DP 18	70	0	0	0	1.1316E+06	0.00095572
22	DP 19	80	0	0	0	1.3849E+06	0.00077175
23	DP 20	90	0	0	0	1.4386E+06	0.00089972
24	DP 21	100	10	20	30	86400	0.0024041
25	DP 22	100	5	10	20	3.393E+05	0.0018035
26	DP 23	100	2.5	5	10	2.3003E+06	0.0011515
27	DP 24	100	1.5	3	6	7.9886E+06	0.00029681
28	DP 25	100	1	2	4	2.044E+07	0.0007998
29	DP 26	100	1.5	2.5	4	2.1222E+07	0.00047212
30	DP 27	100	0.5	1	2	1.0476E+08	0.00054418
31	DP 28	100	1	1.5	3	7.1521E+07	0.0016867

Figura 212. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Table of Design Points							
	K	L	M	N	O	P	
	ation	P10 - Accumulated Time Step	P11 - Current Time Step	P12 - TorqueX	P13 - TorqueY	P14 - Velocidadaresalida	P15 - Velocidadmasalida
			J	J		m s^-1	m s^-1
3		193	193	-240.73	173.67	15.333	16.531
4		314	314	-228.35	254.13	13.77	16.225
5		316	316	-241.71	283.15	14.381	16.207
6		313	313	-242.31	273.98	14.067	16.097
7		317	317	-255.84	283.41	15.393	15.93
8		322	322	-248.97	272.84	14.947	16.097
9		278	278	-250.49	268.23	15.069	15.767
10		312	312	-250.07	258.3	15.254	15.879
11		285	285	-254.03	265.71	15.083	15.93
12		343	343	-261.59	266.83	15.391	15.795
13		308	308	-253.58	239.83	15.443	15.766
14		309	309	-253.72	229.85	15.32	15.8
15		302	302	-241.31	209.92	15.142	15.954
16		292	292	-248.03	213.32	15.274	16.027
17		293	293	-258.18	216.59	15.448	15.994
18		323	323	-253.19	210.9	15.112	16.127
19		297	297	-246.75	190.88	15.165	16.28
20		366	366	-239.85	183.79	14.663	16.474
21		271	271	-259.98	205.78	15.346	16.34
22		271	271	-257.29	199.85	15.405	16.368
23		272	272	-257.38	197.58	15.35	16.388
24		554	554	-188.12	218.02	13.159	16.919
25		346	346	-194.71	202.43	14.936	16.64
26		289	289	-191.27	176.7	14.936	16.489
27		281	281	-187.13	161.9	15	16.511
28		258	258	-190.24	164.6	14.99	16.545
29		232	232	-184.46	160.61	15.123	16.49
30							
31		225	225	-185.2	158.34	15.01	16.541

Figura 213. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Una vez obtenidos los resultados de los diferentes puntos de diseño, se exportan los datos a Excel, lo cual se realiza dando clic derecho sobre cualquier casilla de la tabla y seleccionando la opción “Export Data” (Figura 214), después de lo cual se abre una ventana de guardado en la cual se establece el nombre y el destino del archivo que será generado (Figura 215).

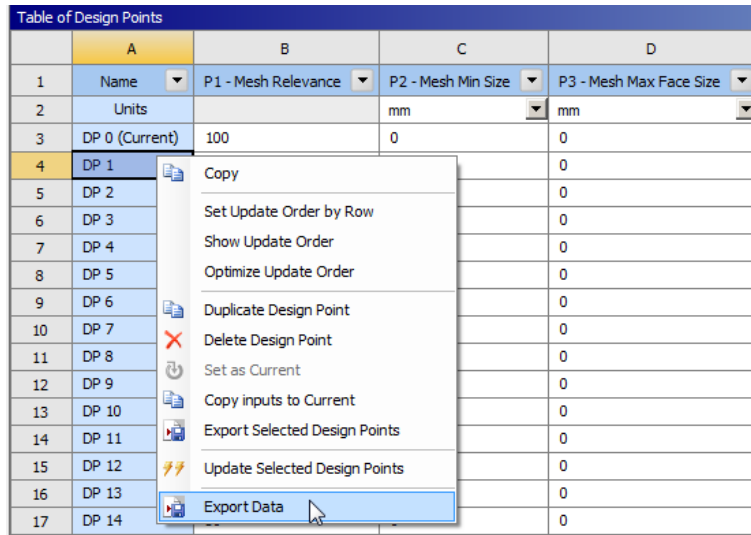


Table of Design Points				
	A	B	C	D
1	Name	P1 - Mesh Relevance	P2 - Mesh Min Size	P3 - Mesh Max Face Size
2	Units		mm	mm
3	DP 0 (Current)	100	0	0
4	DP 1			0
5	DP 2			0
6	DP 3			0
7	DP 4			0
8	DP 5			0
9	DP 6			0
10	DP 7			0
11	DP 8			0
12	DP 9			0
13	DP 10			0
14	DP 11			0
15	DP 12			0
16	DP 13			0
17	DP 14			0

Figura 214. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

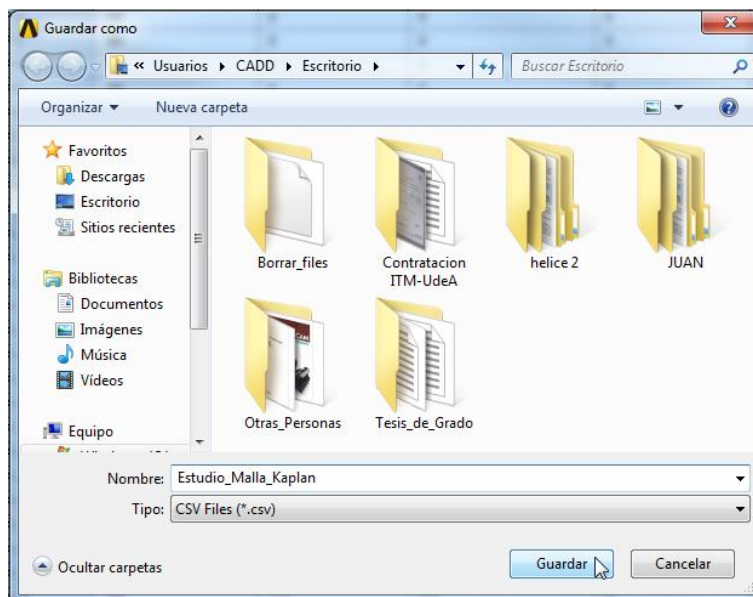


Figura 215. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Luego de tener los datos en Excel, se procede a realizar el análisis de convergencia de los resultados obtenidos, lo cual se llevó a cabo empleando una gráfica de dispersión con líneas suavizadas y marcadores, con el fin de poder observar la ubicación exacta de los valores arrojados dentro de la curva. Gráfica que presenta el comportamiento presentado en la *Figura 216* y para la cual se genera una selección detallada de los puntos de mayor convergencia con el fin de determinar de mejor manera el rango en el cual comienza a comportarse de forma constante (*Figura 217*).

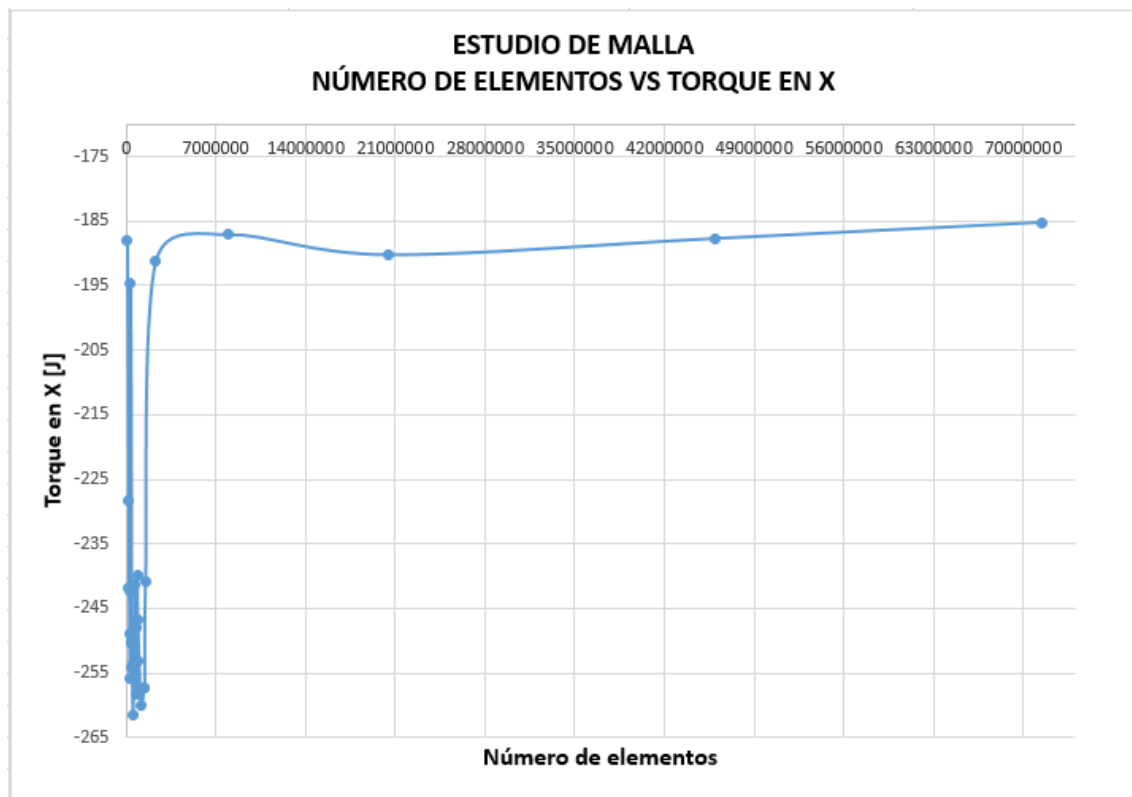


Figura 216. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

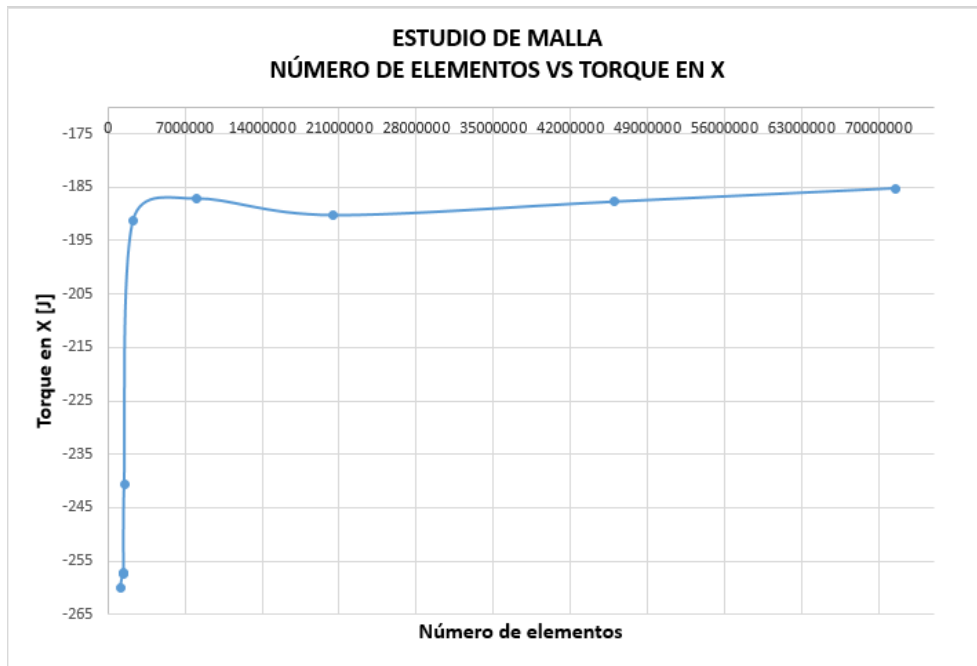


Figura 217. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

Gráficas que deben realizarse como se mencionó anteriormente para cada una de las variaciones en el ángulo del álabe de la turbina, y que permiten determinar la configuración más idónea para realizar el mallado y la simulación de la misma. Por lo cual el paso a seguir es configurar la malla con los valores del punto de diseño establecido para generar una malla con la cantidad aproximada de los elementos requeridos para que la variación de los resultados sea insignificante.

Esto se hace ingresando al módulo de mallado y seleccionando de la ventana “Outline”, luego “Mesh” y desplegando inicialmente la pestaña “Defaults” para establecer la relevancia requerida, en este caso con un valor de 100 y luego desplegando la pestaña “Sizing”, en la cual se deben consignar los valores del arrojados en el punto de diseño, que para este caso fueron para “Min Size” de 1.5 mm, para “Max Face Size” de 3.0 mm y para “Max Size” de 6.0 mm (Figura 218). Después de lo cual se ejecuta la malla dando clic en el “Generate Mesh” y se obtiene la geometría mallada (Figura 219) que será posteriormente llevada a análisis, siguiendo el mismo proceso de configuración de módulo de CFX planteado en el capítulo anterior.

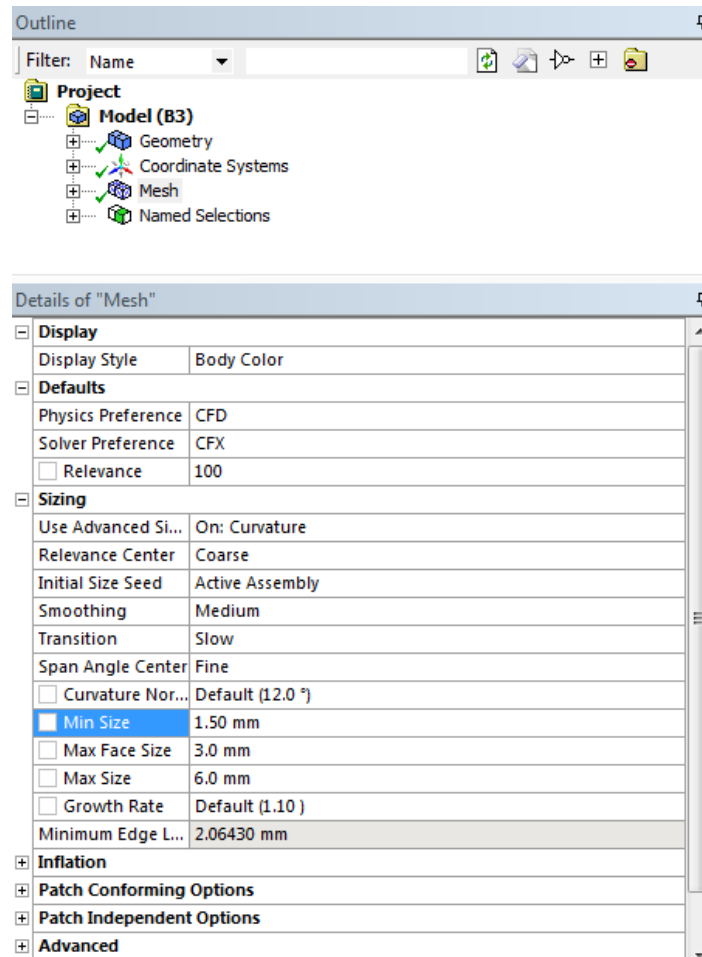


Figura 218. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

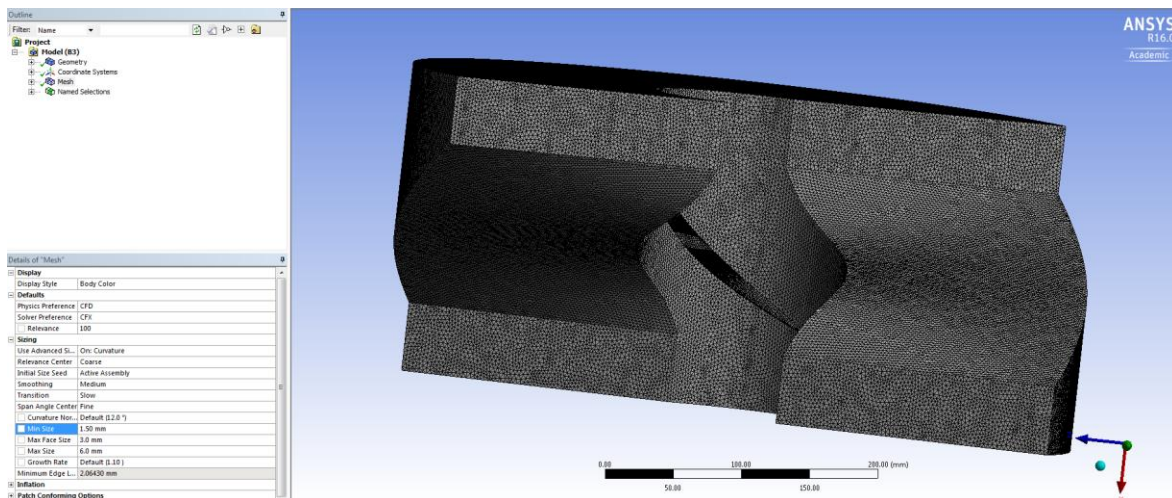


Figura 219. Proceso para realizar un estudio de malla empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.5. Capítulo V: Artículo realizado a partir del trabajo

METODOLOGÍA DE DISEÑO Y SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DE UNA MICROTURBINA TIPO KAPLAN USANDO HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Carlos Andrés Sánchez-Ríos*, Cristian Camilo Cardona-Mancilla** y Diego Andrés Hincapié-Zuluaga***

Instituto Tecnológico Metropolitano, *carlossanchez1307@gmail.com,

cristianmancilla17@gmail.com, *diegohincapie@itm.edu.co

Abstract— In this paper a simulation model of a 6 blades Kaplan microturbine is used; with this, the effect caused by the variation of the pitch of the turbine when obtaining power at the output shaft is analyzed, parametrically implementing different rotation speeds of the latter related to the surrounding water flow. The geometry is simplified to reduce the processing time, discretization and the model analysis; the simulation was performed under defined boundary conditions and using computational fluid dynamics. With the data obtained, is was generated a series of 2D and 3D performance curves, that allows to characterize the behavior of the microturbine Kaplan type, taking into account the inclination of the blades and speed of rotation of the impeller, in order to determine the ranges operation in which the highest power output is obtained.

Keywords— Micro generators, hydrodynamic simulation, blades position, Kaplan turbine.

Resumen— En este trabajo se utiliza un modelo de simulación de una microturbina tipo Kaplan de 6 álabes; con éste, se analiza el efecto causado por la variación del paso de la turbina en la obtención de potencia de eje a la salida, implementando paramétricamente diferentes velocidades de giro de ésta con respecto al flujo de agua circundante. La geometría es simplificada con el fin de reducir el tiempo de procesamiento en la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

discretización y análisis del modelo; la simulación fue realizada bajo condiciones de frontera definidas y empleando dinámica de fluidos computacional. Con los datos obtenidos, se busca generar curvas de rendimiento 2D y 3D, que permiten caracterizar el comportamiento de la microturbina tipo Kaplan, tomando en consideración la inclinación de sus álabes y la velocidad de giro del rodete, con el fin de determinar los rangos de operación en los cuales se obtiene la mayor entrega de potencia.

Palabras clave— Micro generadores, simulación hidrodinámica, inclinación de álabes, turbina tipo Kaplan.

I. INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento de la población, se presentan necesidades que requieren soluciones desde la ingeniería para mejorar la calidad de vida de las personas; un ejemplo de esto, es la escasez de energía eléctrica en diferentes comunidades, debido a la dificultad de llevar dicho recurso a lugares remotos. Una solución a esta problemática, es la implementación de micro estaciones de generación hidráulica en dichas poblaciones, con el fin de aprovechar el potencial intrínseco de las corrientes de agua. Las turbinas hidráulicas extraen energía del fluido en forma continua, convirtiéndola en un momento de torsión aplicado a un eje en rotación, esta tecnología brinda la oportunidad de utilizar un recurso abundante en Colombia y no perjudicial para el medio ambiente; la presencia de gran cantidad de fuentes de agua, así como el bajo costo y fácil mantenimiento de los sistemas de micro generación eléctrica, pueden ser aprovechados por grandes y pequeñas comunidades para proveerse del suministro básico de electricidad.

Las micro turbinas tipo Kaplan son turbomáquinas de reacción de flujo axial, las cuales, junto a las turbinas Michell Banki, generan mayor velocidad de giro en el rodete y son usualmente utilizadas para la generación eléctrica, impulsadas por columnas de agua entre 5 y 70 m [1], lo que permite su uso en ríos o riachuelos con pocas diferencias de altura. Normalmente la cantidad de álabes que componen la hélice de las turbinas Kaplan varía de 3 a 7 [1]; su principal característica es la posibilidad de rotación de sus álabes, con el fin de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

orientarlos mejor frente al flujo de agua, aumentando la eficiencia en la transferencia de energía, del fluido al rodete. Cuando un álabe móvil interactúa con un fluido en movimiento (chorro de agua), entre el álabe y éste se generan fuerzas que realizan trabajo por medio del desplazamiento del álabe.

El diseño de turbinas hidráulicas tipo Kaplan, a pesar de tener un cálculo teórico, se valida principalmente con resultados experimentales obtenidos en modelos a escala según la dimensión de la turbina. Un buen diseño, en cuanto a tamaño y velocidad, puede ser adaptado a otras velocidades y tamaños geométricos similares, aplicando la teoría denominada escalamiento de modelos [2]. Debido a la gran cantidad de información recopilada ha sido posible simplificar la selección de una turbina usando únicamente dos variables: el caudal y la cabeza de presión.

Con el avance de los sistemas computacionales en lo referente a capacidad y velocidad de cálculo, en la actualidad se encuentran disponibles varios software comerciales para realizar simulaciones numéricas de la dinámica de fluidos (CFD) en turbomáquinas, los cuales son empleados como una valiosa herramienta de apoyo en el proceso de diseño, optimización y análisis de turbomaquinaria, este puede llegar a simular el comportamiento del fluido y su interacción con los diferentes componentes. Esto puede reducir significativamente el tiempo de desarrollo de la nueva turbomáquina y su optimización [3].

En Colombia, hasta el año 2008, solo se identificaron tres empresas dedicadas al diseño y/o construcción de las turbinas Banki, las cuales son: Alfa I.M., Aprotect y Colturbinas. Se encuentra también, a nivel académico e industrial, la gran parte de los trabajos que se enmarcan en el estudio de turbinas tipo Pelton, por ser las de mayor uso en la generación eléctrica, siendo la mayoría orientados a la reparación de los rodetes. Entre los trabajos realizados se encuentran proyectos de recubrimientos con materiales poliméricos para el aumento de la resistencia a la cavitación, propiedades físico-químicas y mecánicas en turbinas hidráulicas [4]. Recientemente se destacan esfuerzos en el uso de sistemas computacionales para el diseño y simulación del comportamiento fluido dinámico en

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

turbinas Pelton de 5 kW [5]. En resumen, en lo referido a la simulación de turbinas de micro generación hidráulica, en Colombia no se registran trabajos en esta área, por lo que el desarrollo de proyectos en dicho sector ofrece amplias posibilidades científicas, tecnológicas y sociales.

En este trabajo se determina la posición adecuada de los álabes, respecto al eje axial en función del torque generado, lo cual permite alcanzar el mayor grado de eficiencia en una turbina tipo Kaplan para micro generadores, considerando como parámetro de evaluación la velocidad de giro del rodete.

II. METODOLOGÍA

Este proyecto está estructurado en tres etapas: Inicialmente se realiza el diseño del modelo virtual de la turbina, luego se ejecuta la simulación del comportamiento hidrodinámico del sistema, finalmente se presenta el análisis y discusión de los resultados.

A. Diseño virtual de las turbinas

Se construyó un modelo de microturbina tipo Kaplan, con un diámetro externo de 300 mm y 6 álabes, los cuales permiten variar su ángulo de ataque (α). Los valores considerados son 17,6°, 32,5°, 43,7°, 51,8°, 57,8°, 62,36° y 65,7°, equivalentes a pasos de 100, 200, 300, 400, 500, 600 y 800 mm. Por lo tanto, serán evaluadas un total de 7 condiciones diferentes en la turbina. Debido a la complejidad geométrica de la turbina Kaplan, es necesario pasar por distintas fases de diseño, para obtener una geometría adecuada.

Se comienza por generar un contorno de jaula de alambre, para posteriormente producir un archivo con la información de las curvas en un formato estándar de transferencia de modelos tridimensional, como lo es el formato .IGES; seguidamente, este archivo es llevado al software PTC Creo® 2.0, el cual es una aplicación profesional para la manipulación y generación de modelos tridimensionales.

En este software se crea una superficie concatenando las diferentes líneas entre los perfiles cerrados de la jaula de alambre. Luego, dicha geometría es solidificada, lo que permite

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

realizar el análisis en los álabes de la turbina cuando hay presencia de un flujo másico circundante que posee ciertas condiciones de frontera definidas.

Posteriormente se procede al ensamble de las partes que conforman la turbina: rodete y álabes, estos últimos distribuidos simétricamente con respecto al eje axial. Una vez construida la geometría correcta, cada elemento de la turbina se lleva al programa Siemens® PLM NX 9.0, en el cual se realiza el ensamble del rodete y los álabes, obteniendo como resultado el modelo virtual de los siete modelos de turbinas Kaplan objeto de análisis, considerando los diferentes pasos de inclinación. Finalmente, se exportan todas las geometrías en formato .IGES, siendo posible continuar con la siguiente fase del proceso de diseño.

Dada la complejidad de la geometría, y debido a la simetría circular de la turbina y sus condiciones de flujo, se realiza un corte del volumen de control tomando un sexto de éste como referencia, con el fin de reducir significativamente el tiempo de cálculo computacional del sistema fluido-dinámico. Para producir las secciones, las turbinas completas fueron llevadas al software Siemens® PLM NX 9.0, donde se generó un volumen a partir del fluido másico circundante a la turbina. Por medio de la manipulación de superficies se produce un plano álabe-álabe que garantizará la simetría de la geometría final. Una vez se tienen las superficies, se realiza el corte respectivo de cada uno de los volúmenes, conteniendo la turbina y el fluido, contando así con una geometría simétricamente seccionada. Una vez realizado este proceso, se procede a su exportación en formato .IGES al software Ansys16.0®.

Para el análisis hidrodinámico del sistema solo es necesario contemplar el volumen de fluido contenido dentro del volumen de control seccionado, ya que este es el único cuerpo considerado en el análisis de la dinámica de fluidos computacional (CFX). El alabe de la turbina que se encuentra al interior del volumen de control se debe extraer mediante una operación booleana, esto debido a que el objetivo de la simulación hidrodinámica aplica únicamente el fluido.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

B1. Simulación hidrodinámica del sistema

Esta parte del trabajo consta de dos etapas: la discretización de la geometría y el análisis fluido dinámico. En la primera etapa, la geometría es discretizada de tal manera que se genera una malla compuesta por una serie de ecuaciones matemáticas, lo cual le permite al módulo de análisis reconocer la geometría y las zonas de interés; en la segunda etapa, se realiza un análisis fluido dinámico induciendo un valor de velocidad de giro a la turbina por medio del flujo circundante de la misma, con el objetivo de obtener el torque en el eje.

B2. Discretización de la geometría

El Método de Volúmenes Finitos (MVF) envuelve una discretización espacial del dominio usando un mallado. La malla es usada como constructor de volúmenes finitos, en los cuales se aplican las ecuaciones [6]. En este caso se hace uso del módulo de mallado del software Ansys16.0® para implementar el MVF; en este módulo se genera una discretización del volumen total en volúmenes más pequeños, que permitan evaluar las ecuaciones de fluidos de Navier-Stokes. Allí el uso de métodos avanzados de mallado permite que dicha discretización cumpla con los parámetros que facilitan la convergencia de la simulación; dichos parámetros son: la oblicuidad, cuyos valores oscilan entre cero y uno, en los cuales se busca que el valor máximo sea lo más alejado posible del límite superior; la relación de aspecto, en la cual se recomienda que su valor máximo sea menor a treinta; y la calidad ortogonal, que requiere que su valor máximo sea en lo posible lo más próximo a uno. En la tabla 1 se pueden observar los valores correspondientes a las métricas de cada uno de los mallados.

Se realiza el proceso de mallado para cada uno de los siete modelos anteriormente diseñados (según los diferentes pasos), obteniendo como resultado el modelo discretizado con elementos de volumen tetraédricos. Se realizó alrededor de 23 estudios de malla tomando como parámetro variable las medidas de tamaño máximo y tamaño máximo de cara con variaciones de éstos entre los 5 y 375 mm, paso seguido se procedió a seleccionar aquellos parámetros de mallado donde se presenta una relación estable entre la calidad del mallado

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO				Código	FDE 089
					Versión	03
					Fecha	2015-01-22

y los resultados obtenidos. Como paso final se nombran las fronteras, entradas y salidas del fluido, con el objetivo de identificarlas fácilmente en el módulo de análisis al momento de realizar la configuración respectiva.

Tabla 1. Datos métricos del mallado de las siete geometrías de la microturbina tipo Kaplan.

Métricas								
Ángulo de ataque (°)		17.65°	32.48°	43.67°	51.85°	57.85°	62.36°	68.56°
Paso (mm)		100	200	300	400	500	600	800
Nodos		382201	100999	86910	35034	29009	62316	75126
Elementos		2059079	548340	470563	183361	150871	333204	404746
Relación de aspecto	Mínimo	1,703	1,1772	1,1789	1,1909	1,1843	1,1919	1,1835
	Máximo	5,1092	5,1208	4,8612	4,6719	4,9273	4,8669	4,9608
	Promedio	1,8708	1,8133	1,8301	1,894	1,9841	1,8311	1,8341
	Desviación estándar	0,4305	0,4132	0,4052	0,4323	0,4754	0,4097	0,417
Oblicuidad	Mínimo	6,3665	9,6645	1,8216	1,6189	1,8485	1,7602	4,1081
	Máximo	0,6103	0,6031	0,5935	0,5894	0,6118	0,6055	0,6146
	Promedio	0,2338	0,2019	0,2130	0,2451	0,2883	0,2124	0,213
	Desviación estándar	0,172	0,1615	0,1613	0,164	0,1694	0,1621	0,1654
Calidad ortogonal	Mínimo	0,4344	0,437	0,4503	0,4559	0,4395	0,4542	0,4461
	Máximo	0,9921	0,9884	0,9884	0,9873	0,9902	0,9908	0,9874
	Promedio	0,8632	0,8777	0,8731	0,8554	0,8331	0,8726	0,8723
	Desviación estándar	9,4999	9,0936	8,9427	9,2796	9,7873	9,0803	9,2353

C. Análisis de fluidos computacional

En la década de los 70's se realizaron grandes avances en los métodos numéricos aplicados a la ingeniería, especialmente los relacionados con las técnicas de diferencias finitas y elementos finitos; en el campo de la hidrodinámica se desarrolló la técnica de Dinámica de Fluidos Computacional conocida ampliamente como CFD (Computational Fluid Dynamic) [7]. Usando esta técnica se lleva a cabo un análisis de la turbina Kaplan usando el módulo CFX del software Ansys16.0® en este se definen las fronteras e interfaces del fluido, al igual que una presión de entrada constante de 100 kPa correspondiente a una caída de 10 m; se aplica el modelo de turbulencia k- ω , y se activa la corrección de curvatura y la producción límite con el objetivo de mejorar la obtención de torque [8]. Se definen interfaces de

periodicidad rotacional en las fronteras del fluido para aprovechar la simetría y simplicidad de la geometría en la solución. Para efectuar el análisis se realiza un diseño de experimentos, el cual está compuesto por los siete diferentes pasos de la turbina y las velocidades de giro de esta, por medio de cálculos matemáticos se hallan los valores de intercepción correspondientes a cada paso y se genera un intervalo de once diferentes velocidades, los cuales serán los puntos de simulación.

El principal parámetro en esta etapa del proceso es la velocidad de rotación de la turbina; para cada una de las geometrías involucradas se realizaron un total de 11 experimentos (columnas en la Tabla 2) en los cuales la velocidad angular fue tomada como una variable de acuerdo a las diferentes posiciones de los álabes; estas modificaciones fueron realizadas desde el banco de trabajo de Ansys16.0®. El uso de interfaces en el fluido permitió el acople de la geometría seccionada por medio del mallado, lo cual asegura la reducción de errores o problemas en la simulación.

Tabla 2. Velocidades angulares dadas en RPM, inducidas a la turbina de acuerdo al paso de inclinación de sus álabes.

Paso	Velocidades angulares inducidas (RPM)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
100	0,00	339,26	678,52	1017,78	1357,04	1696,30	2035,56	2374,82	2714,08	3053,34	3392,60
200	354,95	354,95	709,90	1064,85	1419,80	1774,75	2129,70	2484,65	2839,60	3194,55	3549,50
300	505,88	252,94	505,88	758,82	1011,76	1264,70	1517,64	1770,58	2023,52	2276,46	2529,40
400	583,98	194,66	389,32	583,98	778,64	973,30	1167,96	1362,62	1557,28	1751,94	1946,60
500	631,16	157,79	315,58	473,37	631,16	788,95	946,74	1104,53	1262,32	1420,11	1577,90
600	667,85	133,57	267,14	400,71	534,28	667,85	801,42	934,99	1068,56	1202,13	1335,70
800	590,60	98,46	196,92	295,38	393,84	492,30	590,60	689,22	787,68	886,14	984,60

En total se cuenta con siete geometrías, cada una con 11 diferentes velocidades angulares, lo cual arroja 77 valores de torque; para proceder con el análisis respectivo es necesario calcular la potencia del eje de salida, la cual es el producto entre la velocidad de giro aplicada y el torque obtenido, como se observa en la ecuación (1) [9].

$$P = \frac{w * M}{1000} \quad (1)$$

III. RESULTADOS

De la *Figura 220* a la *Figura 222* es posible observar la generación de los componentes necesarios para el análisis de las siete geometrías de la turbina Kaplan, en las diferentes fases del proceso de diseño:

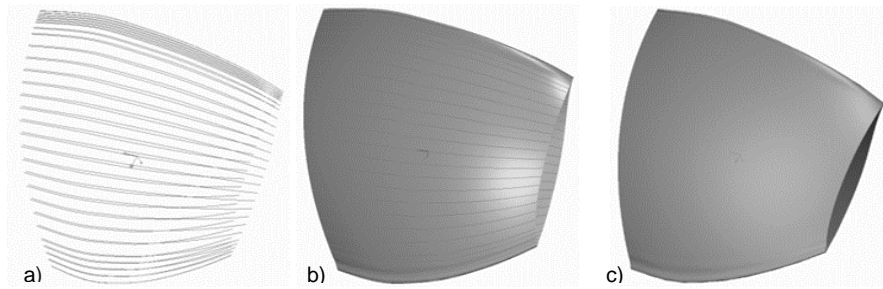


Figura 220. Creación de la superficie que describe los álabes. a) Jaula de alambre, b) superficie completa, c) álabe sólido.

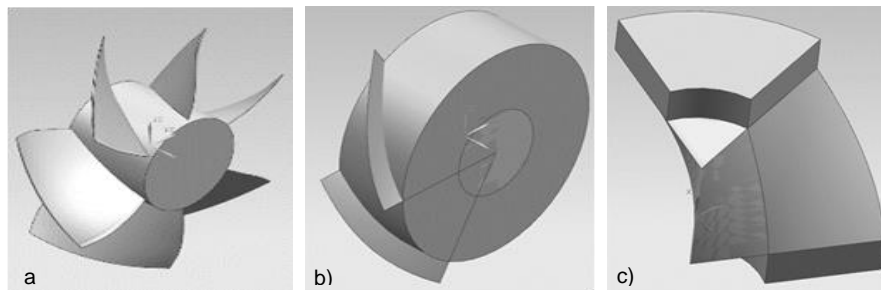


Figura 221. Cuerpo representativo del volumen seccionado para un paso de 500 mm. a) Ensamble del rotor de la turbina Kaplan b) Volumen de fluido junto con el rotor de la turbina Kaplan, y c) Volumen de control utilizado en la simulación.

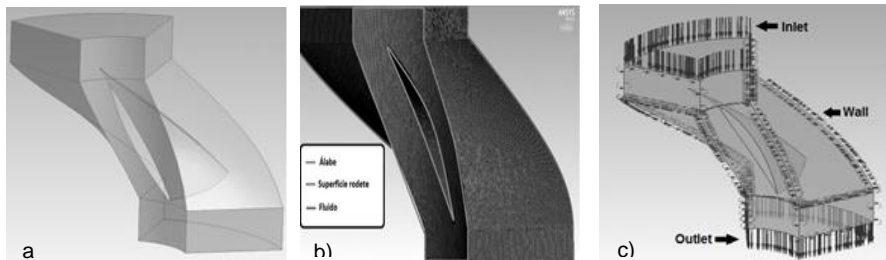


Figura 222. Diferentes fases de análisis fluido dinámico usando un sexto de la sección. a) Generación del fluido circundante, b) generación de la discretización del fluido, c) configuración de fronteras y condiciones de flujo donde se aprecian las direcciones e interfaces del fluido.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la solución se cuenta con un promedio en todo el proceso de simulación de 50 iteraciones para la convergencia de los fenómenos físicos a un residual de e^{-3} . Una vez finalizada toda la serie de análisis se procede a la interpretación de los resultados obtenidos; para facilitar esto, se genera una superficie de potencia de eje de salida, donde se observa un comportamiento de cada paso en función de la velocidad de rotación de la turbina y el ángulo de ataque de los álabes. Para esto, todos los datos fueron procesados en Matlab® 2012, donde se realizó la tabulación y organización en forma de una matriz; estos datos pueden ser observados en la tabla 3, donde las letras de la “a-f” son los coeficientes polinómicos de la ecuación representativa de las curvas de potencia (2).

$$a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5 \quad (2)$$

Tabla 3. Coeficientes de las ecuaciones polinómicas y de correlación de cada una de las ecuaciones que describen el comportamiento de las curvas, para los diferentes pasos de la turbina.

Coeficientes polinómicos		a	b	c	d	e	f	g	Coeficientes de correlación
Paso	Grado								
100	3	3,22E-03	8,10E-04	-1,48E-08	-6,71E-11	0	0	0	0,9997410
200	4	3,33E-02	1,31E-03	9,08E-07	-6,41E-10	7,89E-14	0	0	0,9975449
300	5	-3,99E-03	2,91E-03	-1,78E-06	2,03E-09	-1,27E-12	2,23E-16	0	0,9998809
400	6	-6,66E-03	4,35E-03	-8,44E-06	1,83E-08	-2,03E-11	1,01E-14	-1,87E-18	0,9988527
500	5	-2,06E-03	3,82E-03	-2,97E-06	3,30E-09	-3,28E-12	8,85E-16	0	0,9999386
600	5	-3,58E-03	4,48E-03	-6,06E-06	8,67E-09	-8,56E-12	2,68E-15	0	0,9991408
800	5	-1,57E-03	3,87E-03	-1,89E-06	-6,30E-09	8,71E-12	-4,51E-15	0	0,9999292

En la *Figura 223* se puede observar como a mayor paso del álabe de la turbina, menor es la velocidad angular requerida para obtener la máxima entrega de potencia; esta máxima entrega de potencia se encuentra cerca de los valores medios del rango de velocidades inducidas. En esta curva igualmente queda presente que la pendiente de las curvas es más negativa en la segunda mitad de los valores medios del rango de velocidades inducidas.

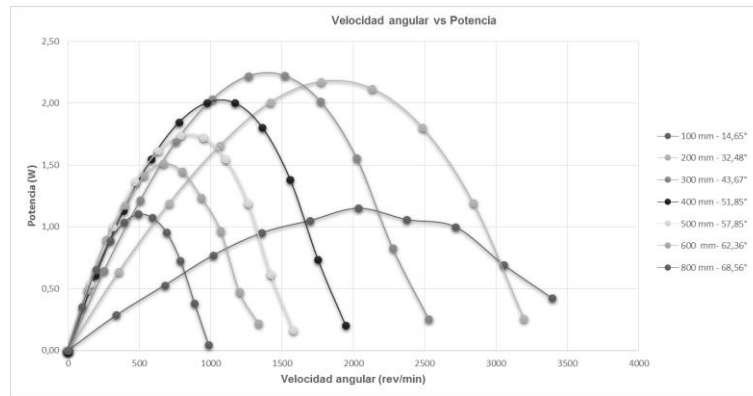


Figura 223. Curvas polinómicas de ajuste de los 7 pasos de la turbina donde se observa la potencia obtenida en función de la velocidad inducida en la turbina.

Continuando con el análisis de resultados, se realiza una interpolación de todo el grupo de la matriz primaria; como resultado se obtiene una matriz secundaria que contiene un grupo de datos homogéneos [10]; con esto se crea la superficie de potencia del eje de salida (Figura 224), la cual corresponde a los resultados obtenidos de una manera mucho más dinámica y puntual. En la Figura 224 se observa que el valor de potencia máximo alcanzado cerca al paso de 300 mm que corresponde a un ángulo de inclinación del álabe de la turbina de $43,7^\circ$ con una velocidad de giro de la turbina entre las 1000 y 2000 rpm. Cabe aclarar que a medida que los valores se alejan de este sector la potencia entregada va disminuye debido al cambio en la interacción del fluido con la superficie del álabe a cada una de las velocidades analizadas.

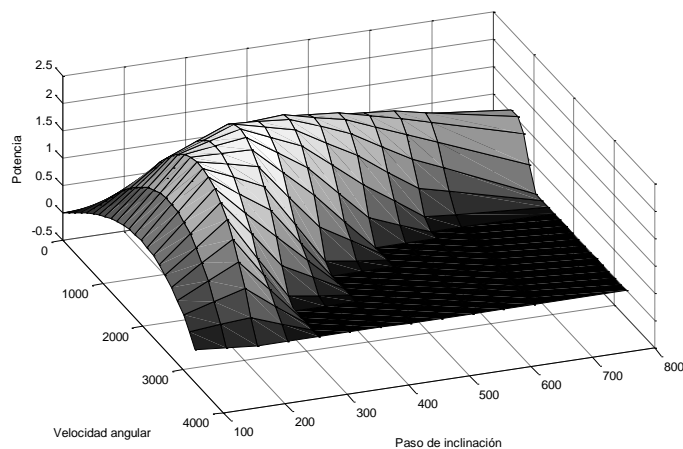


Figura 224. Superficie de potencia generada en el eje de una microturbina tipo Kaplan, para diferentes pasos y velocidades del fluido de la turbina.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

IV CONCLUSIONES

Se nota que tanto en altas como en bajas velocidades angulares, se da un bajo rendimiento en la potencia por parte de la turbina, análogamente desde el punto de vista de la inclinación de los álabes tenemos que en los puntos más altos de inclinación tienen un comportamiento similar, sobre todo a altas velocidades; se tiene que a partir de un paso de 600 mm comienza a decrecer la potencia de eje, siendo aparentemente constante su reducción, en pasos intermedios con valores entre 150 y 500 mm es donde se presenta la mejor obtención de potencia con velocidades angulares entre las 700 y 2700 revoluciones por minuto; para pasos inferiores con valores entre 100 y 150 mm se observa una muy baja obtención de potencia en altas y bajas velocidades. Un mejor desempeño se observa en velocidades angulares intermedias, aunque no es un incremento muy significativo.

Se observa que tanto el ángulo de ataque de los álabes de la microturbina tipo Kaplan como la velocidad de rotación de la turbina, afectan directamente la obtención de potencia de la misma, y que dependiendo de las condiciones hidrográficas y de la potencia deseada, se puede hacer uso de la simulación computacional y de la generación de una superficie de potencia de eje, como ayuda para determinar sus condiciones de operación.

El contar con una superficie de potencia de eje, es algo bastante provechoso, ya que permite visualizar la información obtenida de una manera más dinámica, y a su vez, posibilita una discretización de los parámetros más significativos. Por otra parte, brinda una idea general del posible comportamiento que pueda tenerse al momento de un análisis experimental o de una configuración intermedia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

V REFERENCIAS

- [1] C. Mataix, «Turbomáquinas hidráulicas,» de Turbomáquinas hidráulicas, Madrid, Litoprint, 1984, pp. 685,716.
- [2] V. Streeter, de Mecánica de fluidos, Mc Graw Hill, 1994.
- [3] J. Wu, K. Shimmei, K. Niikura, K. Tani y J. Sato, de CFD-Based Design Optimization for Hydro Turbines, Journal of Fluids Engineering, 2007, p. 159.
- [4] J. I. Gómez Gómez, E. A. Palacio Higueta y C. A. Paredes Gutiérrez, «La turbina Michell Banki y su presencia en Colombia,» Avances en Recursos Hidráulicos, nº 17, 2008H. D.
- [5] S. Agudelo, F. Obando, N. Sierra, L. Velásquez y W. Enríquez, «Diseño, simulación, fabricación y caracterización de una turbina tipo Pelton de 5kW,» Ingeniería y Competitividad, vol. 15, nº 1, pp. 183-193, 2013.
- [6] Ansys®, «11.1.1. Discretization of the Governing Equations».
- [7] P. Roache, de Computational Fluid Dynamics., Albuquerque: Hermosa Publishers, 1972.M. C.
- [8] D. Jošt, A. Škerlavaj1 y T. Slovenia, «Improvement of efficiency Prediction for a Kaplan Turbine with Advances Turbulence Models,» Journal of Mechanical Engineering, vol. 60, pp. 124-134, 2014.C.
- [9] Martínez Bencardino, de Estadística básica aplicada. - 3a ed, Ecoe Ediciones, 2006.
- [10] Mathworks, «Mathworks,» 17 2 2013. [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com/help/>.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la *Figura 225* a la *Figura 227* es posible observar la generación de los componentes necesarios para el análisis de las siete geometrías de la turbina Kaplan, en las diferentes fases del proceso de diseño:

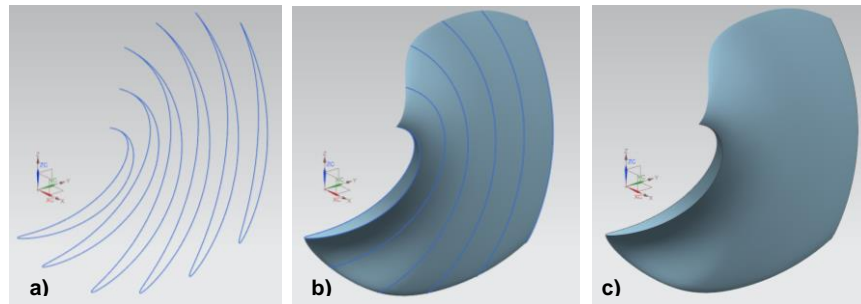


Figura 225. Creación de la superficie que describe los álabes. a) Jaula de alambre, b) superficie completa, c) álabe sólido.

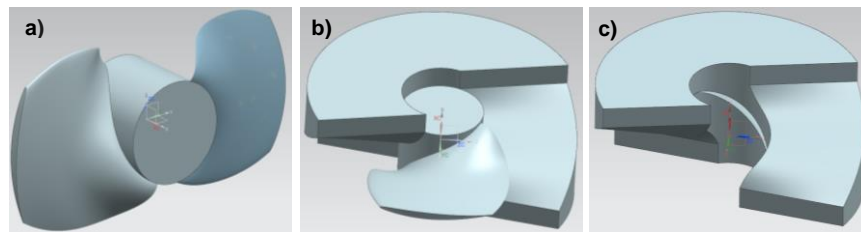


Figura 226. Cuerpo representativo del volumen seccionado para álabe a cero grados (0°). a) Ensamble del rotor de la turbina Kaplan b) Volumen de fluido junto con el rotor de la turbina Kaplan, y c) Volumen de control utilizado en la simulación.

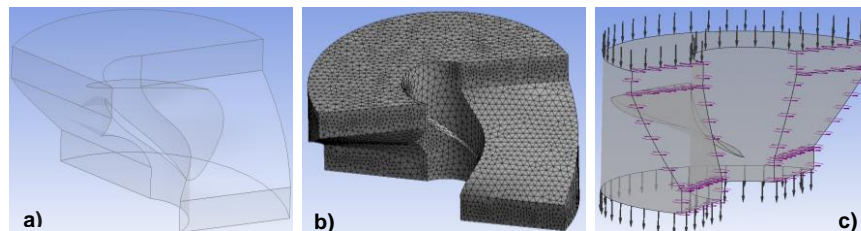


Figura 227. Diferentes fases de análisis fluido dinámico usando un sexto de la sección. a) Generación del fluido circundante, b) generación de la discretización del fluido, c) configuración de fronteras y condiciones de flujo donde se aprecian las direcciones e interfaces del fluido.

De la Figura 228 a la Figura 233 se presentan las gráficas del estudio de malla realizado en las turbinas Kaplan a 0, 15 y 30 grados de inclinación del ángulo de ataque del álabe, estudio que permitió establecer una independencia de malla con respecto a los resultados obtenidos:

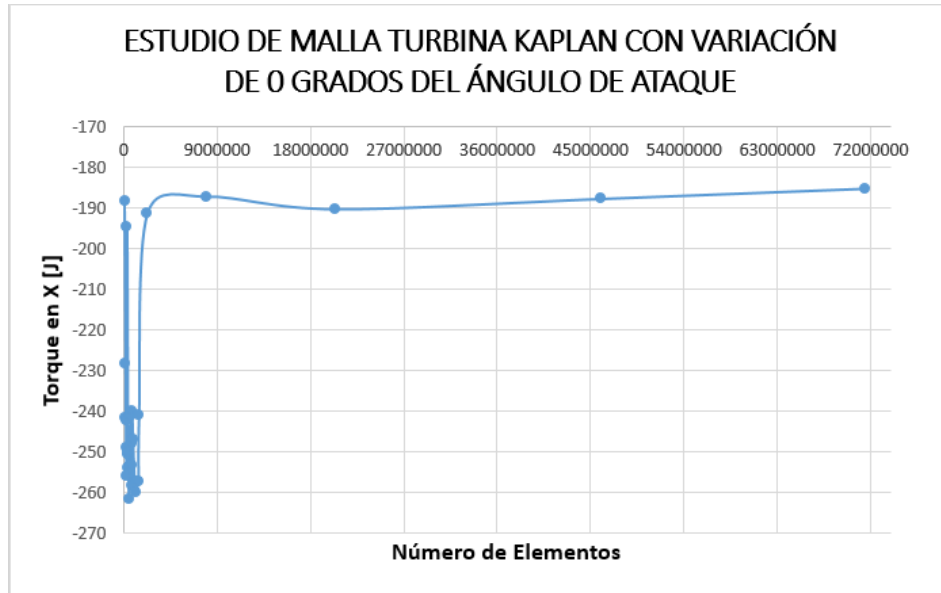


Figura 228. Estudio de malla realizado para una turbina Kaplan con 0 grados de inclinación del ángulo de ataque del álabe, empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

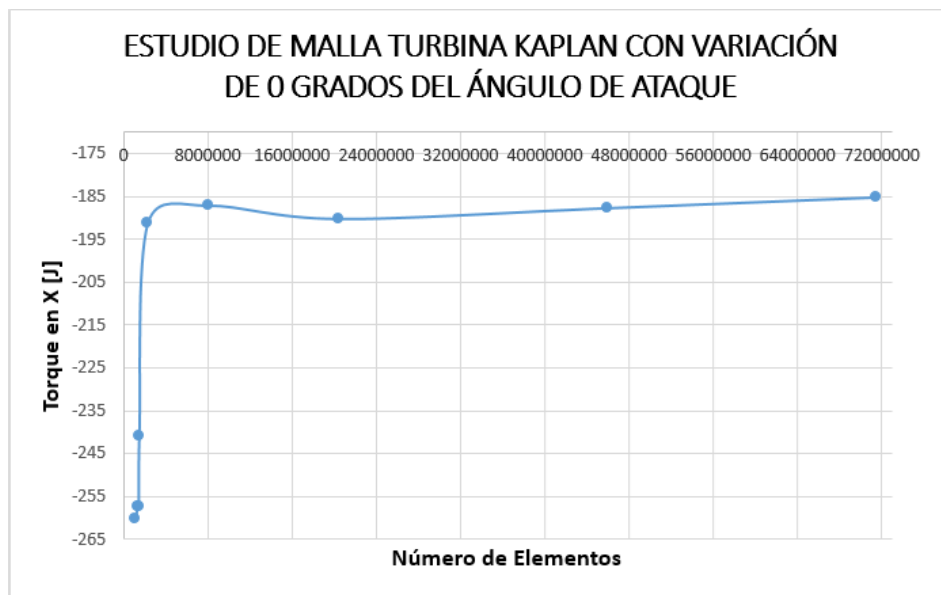


Figura 229. Estudio de malla realizado para una turbina Kaplan con 0 grados de inclinación del ángulo de ataque del álabe, con énfasis en los puntos de interés, empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

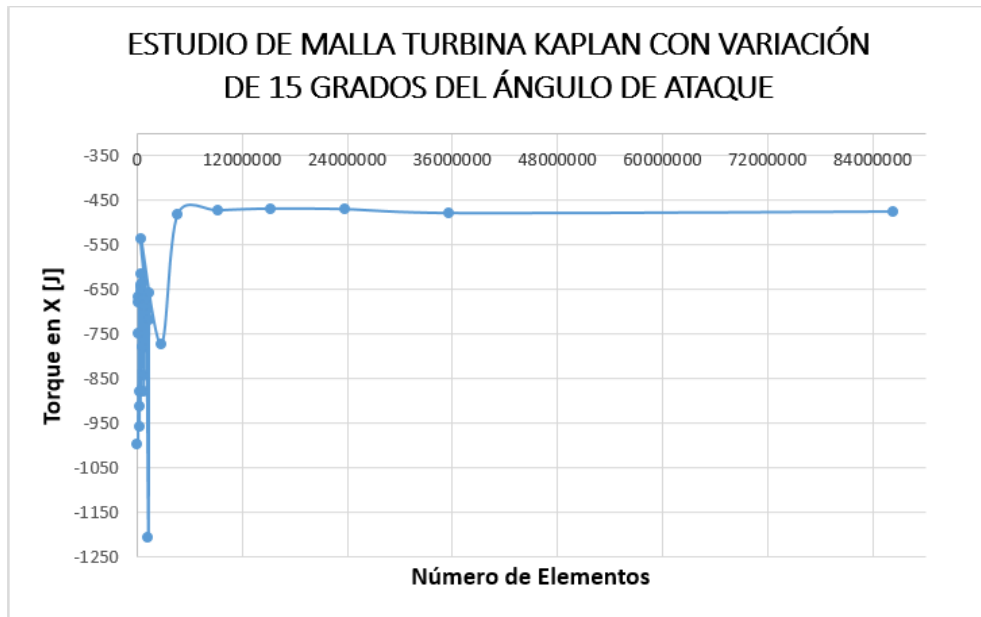


Figura 230. Estudio de malla realizado para una turbina Kaplan con 15 grados de inclinación del ángulo de ataque del álabe, empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

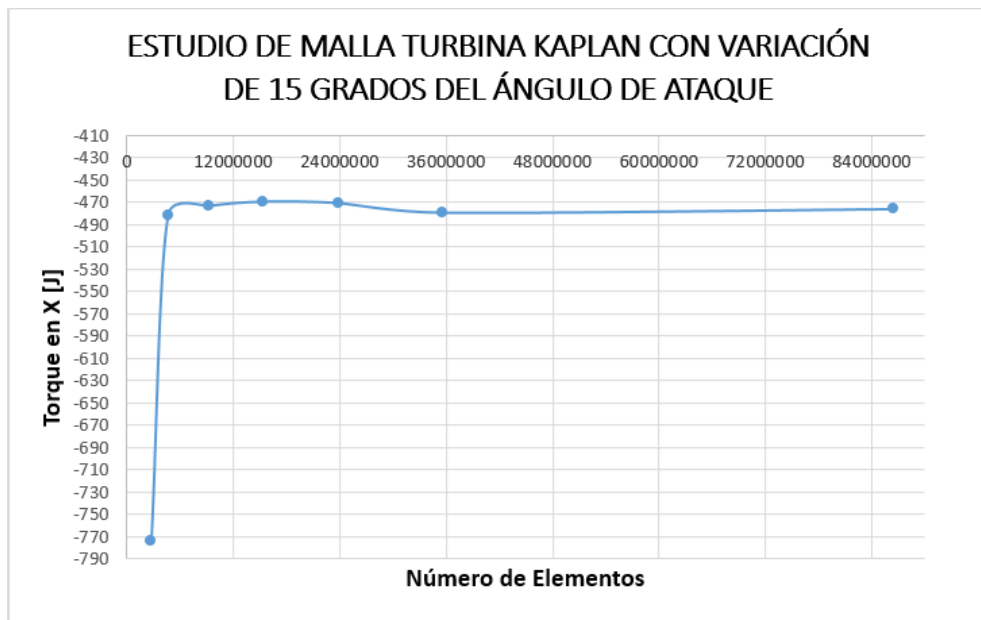


Figura 231. Estudio de malla realizado para una turbina Kaplan con 0 grados de inclinación del ángulo de ataque del álabe, con énfasis en los puntos de interés, empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

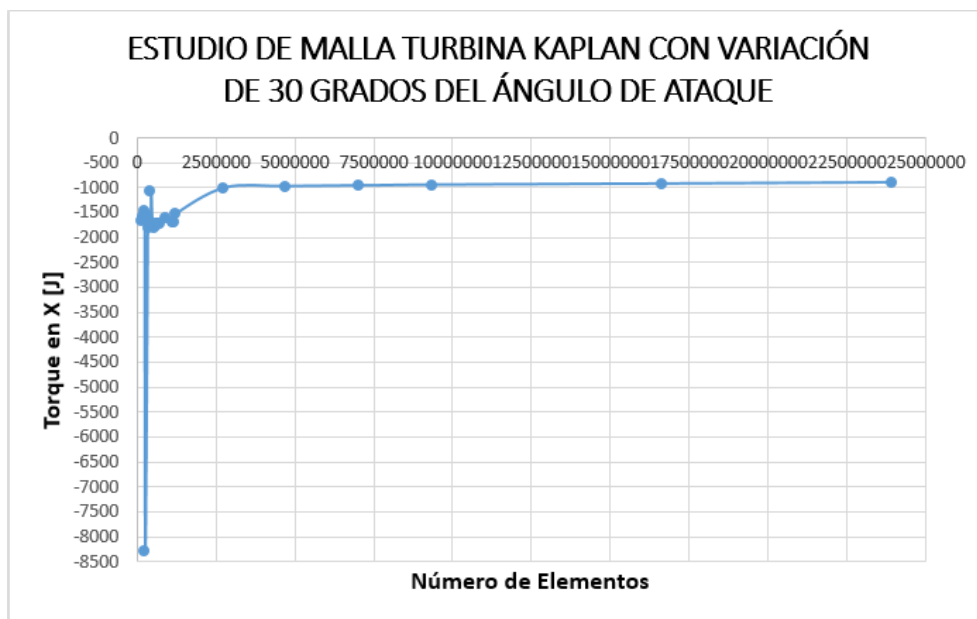


Figura 232. Estudio de malla realizado para una turbina Kaplan con 30 grados de inclinación del ángulo de ataque del álabe, empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

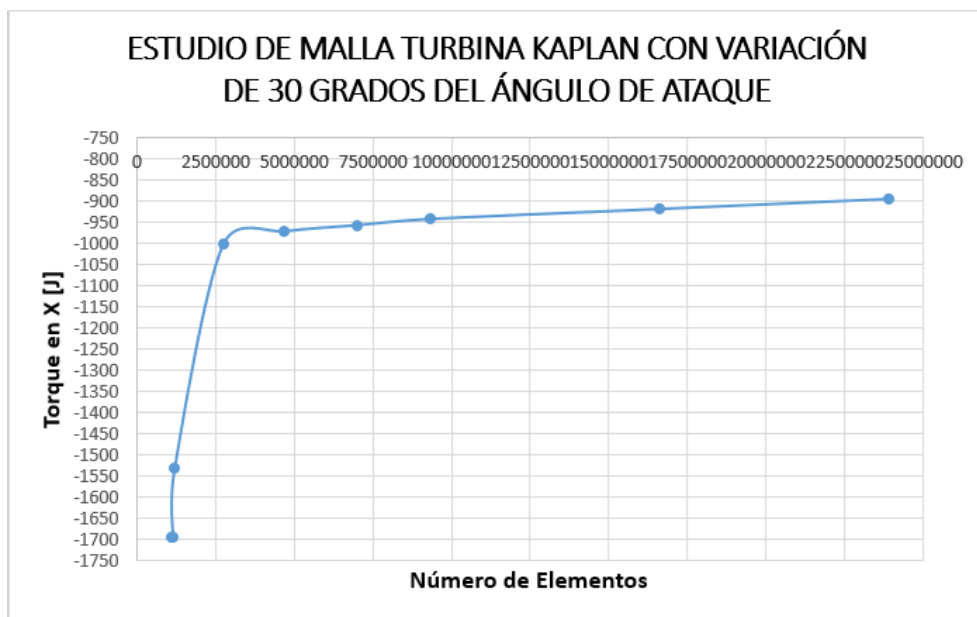


Figura 233. Estudio de malla realizado para una turbina Kaplan con 0 grados de inclinación del ángulo de ataque del álabe, con énfasis en los puntos de interés, empleando puntos de diseño en Ansys16.0®

En la Figura 234 se puede observar cómo a mayor paso del álabe de la turbina, menor es la velocidad angular requerida para obtener la máxima entrega de potencia; esta máxima entrega de potencia se encuentra cerca de los valores medios del rango de velocidades inducidas. En esta curva igualmente queda presente que la pendiente de las curvas es más negativa en la segunda mitad de los valores medios del rango de velocidades inducidas.

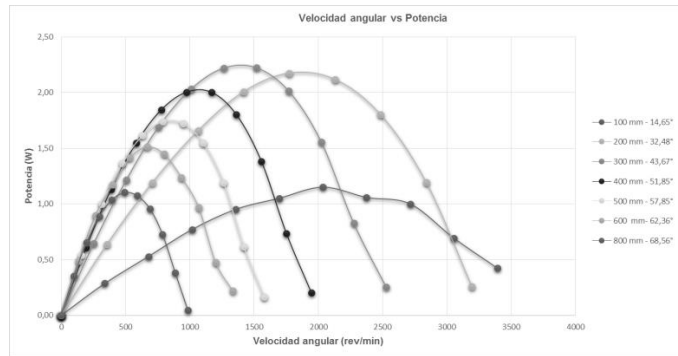


Figura 234. Curvas polinómicas de ajuste de los 7 pasos de la turbina donde se observa la potencia obtenida en función de la velocidad inducida en la turbina.

Continuando con el análisis de resultados, se realiza una interpolación de todo el grupo de la matriz primaria; como resultado se obtiene una matriz secundaria que contiene un grupo de datos homogéneos; con esto se crea la superficie de potencia del eje de salida (Figura 235), la cual corresponde a los resultados obtenidos de una manera mucho más dinámica y puntual. En la Figura 235 se observa que el valor de potencia máximo alcanzado cerca al paso de 300 mm que corresponde a un ángulo de inclinación del álabe de la turbina de 43,7° con una velocidad de giro de la turbina entre las 1000 y 2000 rpm. Cabe aclarar que a medida que los valores se alejan de este sector la potencia entregada va disminuye debido al cambio en la interacción del fluido con la superficie del álabe a cada una de las velocidades analizadas.

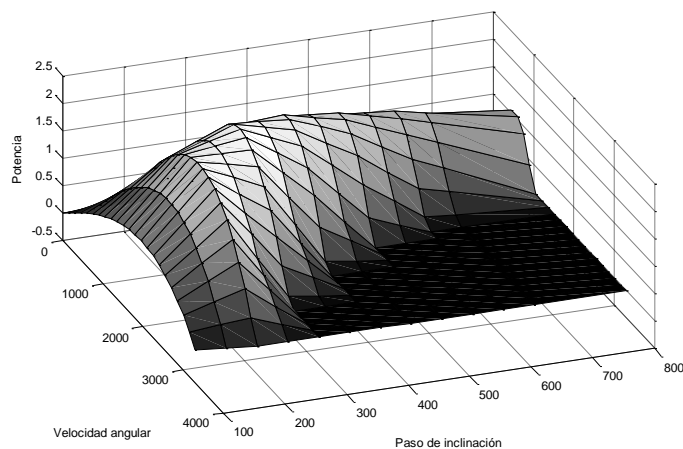


Figura 235. Superficie de potencia generada en el eje de una microturbina tipo Kaplan, para diferentes pasos y velocidades del fluido de la turbina.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Se nota que tanto en altas como en bajas velocidades angulares, se da un bajo rendimiento en la potencia por parte de la turbina, análogamente desde el punto de vista de la inclinación de los álabes tenemos que en los puntos más altos de inclinación tienen un comportamiento similar, sobre todo a altas velocidades; se tiene que a partir de un paso de 600 mm comienza a decrecer la potencia de eje, siendo aparentemente constante su reducción, en pasos intermedios con valores entre 150 y 500 mm es donde se presenta la mejor obtención de potencia con velocidades angulares entre las 700 y 2700 revoluciones por minuto; para pasos inferiores con valores entre 100 y 150 mm se observa una muy baja obtención de potencia en altas y bajas velocidades. Un mejor desempeño se observa en velocidades angulares intermedias, aunque no es un incremento muy significativo.

Se observa que tanto el ángulo de ataque de los álabes de la microturbina tipo Kaplan como la velocidad de rotación de la turbina, afectan directamente la obtención de potencia de la misma, y que dependiendo de las condiciones hidrográficas y de la potencia deseada, se puede hacer uso de la simulación computacional y de la generación de una superficie de potencia de eje, como ayuda para determinar sus condiciones de operación.

El contar con una superficie de potencia de eje, es algo bastante provechoso, ya que permite visualizar la información obtenida de una manera más dinámica, y a su vez, posibilita una discretización de los parámetros más significativos. Por otra parte, brinda una idea general del posible comportamiento que pueda tenerse al momento de un análisis experimental o de una configuración intermedia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

BASISWISSEN, S. (01 de 01 de 2010). *Allgemeines über Turbinen*. Recuperado el 24 de 04 de 2012, de <http://rs-saarburg.bildung-rp.de/MN/Wasserkraft/artenT.htm>

Blanco, J., Secretan, C., Amarante, Y., & Mesquita, A. (septiembre de 2008). Decision support system for micro-hydro. *Energy for Sustainable Development, Volume XII(3)*.

Drinkwaard, W., Kirkels, A., & Romijn, H. (5 de JULIO de 2010). A learning-based approach to understanding success in rural electrification: Insights. *Energy for Sustainable Development, 14*, 232–237.

Göde, E., & Ryhming, I. (1987). 3D-Computation of the flow in a Francis runner. *Sulzer Technical Review No. 4*.

Göde, E., Cuénod, R., & Pestalozzi, J. (1989). Visualization of flow phenomena in a hydraulic turbine based on 3D flow computations. *Waterpower*.

Gomez Gomez, J., Palacio, E., & Paredes, C. (2008). La turbina Michell-Banki y su presencia en Colombia. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 33-42.

Hallett, M. (16 de julio de 2009). Distributed power in Afghanistan: The Padisaw micro-hydro project. *Renewable Energy, 34*, 2847–2851.

Hanmandlu, M., & Goyal, H. (20 de JULIO de 2008). Proposing a new advanced control technique. *Electrical Power and Energy Systems, 30*, 272–282.

Hydroni. (01 de 01 de 2011). *Hidroni*. Recuperado el 24 de 04 de 2012, de <http://www.hydroni.co.uk/index.html>

Ion, C., & Marinescu, C. (16 de FEBRERO de 2011). Autonomous micro hydro power plant with induction generator. *Renewable Energy, 36*, 2259e2267.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Keck, H. (1978). Die Anwendung der Finite-Elemente-Methode auf die Berechnung von 3D-Potentialströmungen. *Internal Escher Wyss Report*, WT-78-566.

Keck, H., & Hass, W. (1980). Vorticity and blade circulation modeling in the calculation of quasi-three-dimensional cascade flows with finite elements. *Finite Elements in Flow Problems*.

Keck, H., Gode, E., & Pestalozzi, J. (1992). Experience with 3D Euler flow analysis as a practical design tool. *IAHR*, 23.

Keck, H., Gode, E., Grunder, R., & Pestalozzi, J. (1992). Upgrading by new runners based on 3D-flow simulation and model testing. *IAHR Symposium*.

Lauder, B., & Spalding, D. (1972). *Mathematical Models of Turbulence*. London/New York: Academic Press.

Márquez, J., Molina, M., & Pacas, J. (20 de MARZO de 2010). Dynamic modeling, simulation and control design of an. *International Journal of Hydrogen Energy i n t e r n a t i o n a l j o u r n a l o f hydrogen energy*, 35, 5772 – 5777.

Mataix, C. (1975). *Turbomaquinas hidraulicas: Turbinas hidraulicas, bombas, ventiladores*. Madrid: Editorial ICAI .

Nouni, M., Mulick, T., & Kandpal, T. (8 de 12 de 2004). Techno-economics of micro-hydro projects for decentralized power. *Energy Policy*, 34, 1161–1174.

OSSBERGER GmbH + Co. (2007). *Ossberger*. Recuperado el 24 de 04 de 2012, de <http://www.ossberger.de/cms/>

Pigaht, M., & Van der Plas, R. (16 de JULIO de 2009). Innovativeprivatemicro-hydropowerdevelopmentinRwanda. *Energy Policy*, 37, 4753–4760.

Poveda, G. (2007). *Ruedas y turbinas hidráulicas en la historia*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Roache, P. (1972). *Computational Fluid Dynamics*. Albuquerque: Hermosa Publishers.

Rouse, H., & Ince, S. (1957). *History of hydraulics*. Iowa City: Iowa Institute of Hydraulic Research.

Streeter, V. (1994). *Mecánica de fluidos*. Mexico: Mc Graw Hill.

Wu, J., Shimmei, K., & Tani, K. (2007). CFD-Based Design Optimization for Hydro Turbines. *Journal of Fluids Engineering*, 159.

Yassi, Y., & Hashemloo, S. (3 de ABRIL de 2010). Improvement of the efficiency of the Agnew micro hydro turbine at part loads due. *Energy Conversion and Management*, 51, 1970–1975.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES Cristian Camilo Cardona Mancilla
Carlos Andrés Sánchez Pro S

FIRMA ASESOR Diego A Hincapié

FECHA ENTREGA: 29/05/2015

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____