



**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

**SIMULACIÓN CFD DEL FENÓMENO DE  
CAVITACIÓN EN TURBINAS HIDRÁULICAS  
TIPO KAPLAN**

**Autor:**

Victor Alejandro Mier y Terán del Sol

C.I.: 20.524.679



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**SIMULACIÓN CFD DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN TURBINAS  
HIDRÁULICAS TIPO KAPLAN**

Proyecto del trabajo de grado para optar al título de  
**INGENIERO MECÁNICO**

**Autor:** Victor Alejandro Mier y Terán del Sol

C.I.: 20.524.679

**Tutor:** Ing. Gruber A. Caraballo V.

San Diego, Mayo 2019





**FI-M -003-2019-ICR**


Valencia, 14 de Marzo de 2019

Ciudadano:  
Víctor Mier y Terán del Sol  
C.I:20.524.679  
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2019 de fecha 14-03-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **SIMULACIÓN CFD DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN TURBINAS HIDRÁULICAS TIPO KAPLAN** presentado por usted como requisitos para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Gruber Caraballo, C.I: 12.014.408 y la Ing. Alicia Yáñez, C.I: 4.598.880 como Tutores Académicos que los asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

  
**Prof. Luis Lira**  
Decano de la Facultad de Ingeniería



c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

L/lc.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA

UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

### ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Gruber A. Caraballo V. portador de la cédula de identidad N° 12.014.408, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el ciudadano Victor Alejandro Mier y Terán del Sol, cédula de identidad N° 20.524.679, titulado **“SIMULACIÓN CFD DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN TURBINAS HIDRÁULICAS TIPO KAPLAN”** presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los trece días del mes de mayo del año dos mil diecinueve.

Firma

Ing. Gruber A. Caraballo

V. C.I.: 12.014.408

Tutor Académico



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE MECÁNICA**

San Diego, Mayo 2019

**ACTA DE REVISIÓN DEL PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO**

Quienes suscriben esta Acta, dejan constancia que el Proyecto de Trabajo de Grado: **“SIMULACIÓN CFD DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN TURBINAS HIDRÁULICAS TIPO KAPLAN”** ha sido revisado y, cumpliendo con los requisitos exigidos para su aprobación, recomiendan su tramitación ante el organismo académico correspondiente.

Ing. Gruber A. Caraballo V.

**Tutor Académico**

\_\_\_\_\_  
**Firma**

\_\_\_\_\_  
**Fecha**

Ing. Alicia de Pizzella

**Tutor Metodológico**

\_\_\_\_\_  
**Firma**

\_\_\_\_\_  
**Fecha**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a Dios, por estar presente en mi vida, y proporcionarme la salud, la voluntad, la sabiduría y la fuerza para superar las adversidades y lograr mis sueños y metas. De igual modo, agradecer a mi tutor, el Profesor Gruber A. Caraballo, por proporcionarme sus consejos, sabiduría, y guiatura que fueron indispensables para el desarrollo de este trabajo. A su vez, agradecerle a mis seres queridos, principalmente a mi familia el cual son mi inspiración, como lo son mis padres, que son la base de mi formación y ejemplos a seguir, gracias también a mi hermana, novia y amigos por su incondicional apoyo y ayuda en mi carrera.

## ÍNDICE GENERAL

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pp</b>
<b>RESUMEN INFORMATIVO</b>	<b>xv</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO</b>	<b>3</b>
<b>I EL PROBLEMA</b>	<b>3</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema .....	4
1.3 Objetivos de la investigación .....	4
1.3.1 Objetivo general .....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Justificación.....	5
1.5 Limitaciones .....	5
1.6 Alcance.....	6
<b>II MARCO TEÓRICO</b>	<b>8</b>
2.1 Antecedentes de la investigación .....	8
2.2 Bases teóricas .....	9
2.2.1 Máquinas hidráulicas.....	10
2.2.2 Turbinas hidráulicas. ....	11
2.2.3 Elementos constructivos de las turbinas.....	13
2.2.4 Turbinas tipo Kaplan.....	14
2.2.4.1 Principales componentes de la turbina Kaplan.....	15
2.2.6 Variación de presión y velocidad del agua e turbinas a reacción.....	19
2.2.7 Análisis del flujo entre el distribuidor y el rotor de turbinas axiales tipo Kaplan. ....	21
2.2.8 Fundamentos de mecánica de fluidos aplicado a las turbomáquinas .....	22
2.2.8.1 Primera forma de la ecuación de Euler.....	22
2.2.8.2 Ecuación de Bernoulli .....	23
2.2.9 Modelación matemática .....	24

2.2.9.1 Ecuación de la continuidad .....	24
2.2.9.2 Ecuación de momentum .....	25
2.2.9.3 Ecuación de la energía total .....	26
2.2.9.4 Ecuación de navier-stokes .....	26
2.2.9 Modelo de turbulencia eddy viscosity.....	29
2.2.10 Modelo de turbulencia kappa- epsilon (k –	

4.2 Selección de una turbina real e identificación de sus características geométricas con la finalidad de modelarla mediante una herramienta (CAD) .....	61
4.2.1 Modelado geométrico de los álabes del rotor de la turbina a estudiar por medio de SOLIDWORKS .....	62
4.3 Simulación del campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluido computacional (CFD) .....	64
4.3.1 Se importó el dominio a el Software ANSYS por medio de DesignModeler .....	65
4.3.2 Mallado del dominio fluidizado .....	65
4.3.3 Configuración del dominio, condiciones de borde e interfaces .....	66
4.3.3.1 Ajustes básicos (Basic Settings) .....	67
4.3.3.2 Modelos de fluidos (Fluid Models) .....	69
4.3.3.3 Modelos de pares de fluidos (Fluid Pair Models) .....	70
4.3.3.4 Inicialización (Initialization) .....	71
4.3.3.5 Establecimiento de las condiciones de borde. ....	72
4.3.3.6 Configuración de Solver .....	75
4.4 Obtención de los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático	76
4.4.1 Convergencia de las simulaciones .....	77
4.4.2. Estudio del campo de flujo para el rotor de la turbina Kaplan .....	87
4.4.2.1. Estudio del campo de flujo para álabes orientados a 15° .....	88
4.4.2.2. Estudio del campo de flujo para álabes orientados a 22.5° .....	90
4.4.2.3. Estudio del campo de flujo para álabes orientados a 30° .....	93
4.4.2.4. Estudio del campo de flujo para álabes orientados a 37.5° .....	95
4.4.2.5. Estudio del campo de flujo para álabes orientados a 45° .....	97
4.4.3. Estudio de la cavitación en el rotor de la turbina Kaplan .....	100
4.4.3.1. Fracciones de vapor de agua en planos radiales para los álabes orientados a 15°, 22.5°, 30°, 37.5° y 45° .....	101
4.4.3.2. Medición de vapor de agua para los álabes orientados a 15°, 22.5°, 30°, 37.5° y 45° .....	104

**CONCLUSIONES**

<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>109</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>110</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA</b>	<b>Pp</b>
1 Número de álabes de las turbinas Kaplan en función de la velocidad específica de rotación $n_s$ .....	19
2 Valores residuales RMS de la convergencia para álabes del rotor orientados a 15°, 22.5°, 30°, 37.5°, 45°.....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>	
1 Tipos de turbinas a) Pelton, b) Francis y c) Kaplan.....	12
2 Clasificación de las turbinas hidráulicas.....	13
3 Rotor de turbina Kaplan.....	17
4 Elementos constitutivos de una turbina hidráulica tipo Kaplan.....	18
5 Turbina Kaplan vista del corte de perfil.....	18
6 Variación de la presión y de la velocidad del agua a través de los diferentes órganos que componen una turbina de reacción.....	20
7 Técnicas de aproximación numérica en mecánica de fluidos.....	37
8 Malla estructurada.....	40
9 Cuadrícula estructurada en 2D.....	40
10 Mallado estructurado con interfaz ajustada .....	41
11 Mallado estructurado en bloque 2D sin interfaces ajustadas .....	42
12 Mallado compuesto en 2D .....	42
13 Malla no estructurada .....	44
14 Ejemplo de mallado no estructurado en 2D .....	45
15 Colapso de una burbuja en un flujo libre .....	47

16	Colapso de una burbuja en la zona de una superficie sólida .....	47
17	Cavitación de a) burbuja (bubble) y de b) estrías (streak).....	49
18	Cavitación de lámina (sheet) y de nube (cloud).....	49
19	Tipos de cavitación en turbinas hidráulicas .....	50
20	Cavitación tipo antorcha en turbinas hidráulicas .....	51
21	Coefficiente de Thoma en función de $n_s$ (Turbinas Francis y Kaplan).....	52
22	Correlaciones experimentales para la obtención del coeficiente de Thoma en función de $n_s$ .....	52
23	Turbina Kaplan Gilkes.....	61
24	Vista de planta del diseño del croquis álabe.....	62
25	Redondeo de puntas, extrusión y torsión del álabe.....	62
26	Diseño final del álabe.....	62
27	Diseño del dominio, vista de planta del croquis. ....	63
28	Vista isométrica del dominio en álabes a) 15°, b) 22.5°, c) 30°, d) 37.5° y e) 45°.....	64
29	Importación del dominio en DM.....	65
30	Vista del Dominio en Meshing.....	65
31	Parámetros de la configuración del mallado. ....	66
32	Resultado del mallado.....	66
33	Vista del dominio para realizar su configuración.....	67
34	Ajustes básicos del Agua líquida del dominio.....	68
35	Ajustes básicos del Vapor de agua del dominio. ....	69
36	Configuración con transferencia de calor isotérmica a 298,15°K con turbulencia k- .....	70
37	Configuración de la simulación considerando la cavitación, introducción del modelo de cavitación Rayleigh Plesset y la presión de saturación.....	71
38	Configuración de fracción de volumen de los fluidos.....	72
39	Configuración de la entrada “Inlet” .....	73
40	Configuración de la salida “Outlet” .....	73

41	Configuración de la pared externa “Wall” .....	74
42	Configuración de la pared interna “Wall” .....	74
43	Configuración de la interface.....	75
44	Configuración básica de Solver.....	76
45	Resultado final de todas las configuraciones del dominio, condiciones de borde, interfaces e interacciones.....	76
46	Perfil de Velocidad en álabes orientados a 15°.....	88
47	Perfil de presión en álabes orientados a 15°.....	89
48	Volumen de vapor de agua en álabes orientados a 15°.....	89
49	Vista de conjunto de perfiles de velocidad, presión y cavitación en los álabes orientados a 15°.....	90
50	Perfil de Velocidad en álabes orientados a 22.5°.....	91
51	Perfil de presión en álabes orientados a 22,5°.....	91
52	Perfil de cavitación en álabes orientados a 22,5°.....	92
53	Vista de conjunto de perfiles de velocidad, presión y cavitación en los álabes orientados a 22,5°.....	92
54	Perfil de Velocidad en álabes orientados a 30°.....	93
55	Perfil de presión en álabes orientados a 30°.....	93
56	Perfil de cavitación en álabes orientados a 30°.....	94
57	Vista de conjunto de perfiles de velocidad, presión y cavitación en los álabes orientados a 30°.....	94
58	Perfil de Velocidad en álabes orientados a 37.5°.....	95
59	Perfil de presión en álabes orientados a 37,5°.....	96
60	Perfil de cavitación en álabes orientados a 37,5°.....	96
61	Vista de conjunto de perfiles de velocidad, presión y cavitación en los álabes orientados a 37,5°.....	97
62	Perfil de Velocidad en álabes orientados a 45°.....	98
63	Perfil de presión en álabes orientados a 45°.....	98
64	Perfil de cavitación en álabes orientados a 45°.....	99
65	Vista de conjunto de perfiles de velocidad, presión y cavitación en los álabes	

	orientados a 45°.....	99
66	Planos que cortan el perfil de los álabes y el vapor de agua formado.....	100
67	Líneas para medir el vapor de agua.....	100
68	Fracción de vapor de agua en álabe orientado a 15°.....	101
69	Fracción de vapor de agua en álabe orientado a 22.5°.....	102
70	Fracción de vapor de agua en álabe orientado a 30°.....	103
71	Fracción de vapor de agua en álabe orientado a 37.5°.....	103
72	Fracción de vapor de agua en álabe orientado a 45°.....	104
73	Longitudes en eje Y, que atraviesan álabes orientados en a) 15°, b) 22.5°, c) 30°, d) 37.5° y e) 45°.....	105

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

### GRÁFICAS

1	Representación gráfica de convergencia de Masa y Momento para P= 3169,8 Pa con álabes del rotor orientados a 15°.....	78
2	Representación gráfica de convergencia de Turbulencia para P= 3169,8 Pa con álabes del rotor orientados a 15°.....	78
3	Representación gráfica de convergencia de Masa y Momento para P= 3169,8 Pa con álabes del rotor orientados a 22.5°.....	79
4	Representación gráfica de convergencia de Turbulencia para P= 3169,8 Pa con álabes del rotor orientados a 22.5°.....	80
5	Representación gráfica de convergencia de Masa y Momento para P= 3169,8 Pa con álabes del rotor orientados a 30°.....	80
6	Representación gráfica de convergencia de Turbulencia para P= 3169,8 Pa con álabes del rotor orientados a 30°.....	81
7	Representación gráfica de convergencia de Masa y Momento para P= 3169,8 Pa con álabes del rotor orientados a 37.5°.....	82
8	Representación gráfica de convergencia de Turbulencia para P= 3169,8 Pa con álabes del rotor orientados a 37.5°.....	82
9	Representación gráfica de convergencia de Masa y Momento para P= 3169,8 Pa con álabes del rotor orientados a 45°.....	83
10	Representación gráfica de convergencia de Turbulencia para P= 3169,8 Pa	

	con álabes del rotor orientados a 45° .....	83
11	Imbalance en el dominio de álabes del rotor orientados a 15° para condiciones de borde de P=-101.325 KPa y e=20 m3/h. ....	84
12	Imbalance en el dominio de álabes del rotor orientados a 22.5° para condiciones de borde de P=-101.325 KPa y e=20 m3/h. ....	85
13	Imbalance en el dominio de álabes del rotor orientados a 30° para condiciones de borde de P=-101.325 KPa y e=20 m3/h. ....	86
14	Imbalance en el dominio de álabes del rotor orientados a 37.5° para condiciones de borde de P=-101.325 KPa y e=20 m3/h. ....	86
15	Imbalance en el dominio de álabes del rotor orientados a 45° para condiciones de borde de P=-101.325 KPa y e=20 m3/h. ....	87
16	Fracciones de vapor vs longitudes en eje Y que atraviesan el álabe a 15°...	106
17	Vapor de agua (%) vs Longitud (mm) en álabes orientados a 15°, 22.5°, 30°, 37.5° y 45°.....	107



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA**  
**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE MECÁNICA**

**SIMULACIÓN CFD DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN EN TURBINAS  
HIDRÁULICAS TIPO KAPLAN**

**Autor:** Victor Alejandro Mier y Terán del Sol

**Tutor:** Ing. Gruber A. Caraballo V.

**Fecha:** Mayo 2019

**RESUMEN INFORMATIVO**

La investigación se basó en la simulación y estudio del fenómeno de cavitación en turbinas hidráulicas tipo Kaplan, se usó la técnica de aproximación numérica CFD (computational fluid dynamics por sus siglas en inglés). Con ello se analizó el comportamiento del campo de flujo, su interacción y la influencia que tuvo en los cambios del momento cinético en el campo escalar de presión y el campo vectorial del momento, de modo que se obtuvo patrones de flujo en forma de data, curvas y gráficos que permitió comprender las interacciones entre el fluido y el rotor de la máquina. El principal objetivo fue lograr las diferentes condiciones que permitieron la aparición del fenómeno de cavitación, por lo que se esperó que, por medio de la dinámica de fluidos computacional, CFD, se pudo usar isosuperficies y campos de flujo bifásicos que mostraron los tipos de cavitación en la turbina. La técnica CFD permitió evaluar las ecuaciones de dinámica de fluidos que no se pueden trabajar analíticamente debido a sus complejidades matemáticas, es decir, se usó para resolver numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS), el cual evito los costos en equipos e instalaciones de pruebas. Además, se observó que la orientación más favorable para los álabes del rotor, es estar orientados entre  $30^\circ$  y  $37.5^\circ$ , debido a que se encontró muy poca presencia de cavitación, mientras que la orientación más crítica y de mayor formación de vapor es de  $15^\circ$ .

**Descriptor:** Turbina hidráulica tipo Kaplan, cavitación, dinámica de fluidos computacional (CFD), similitud y análisis dimensional en turbinas hidráulicas.

## INTRODUCCIÓN

El estudio de la interacción entre los fluidos y las máquinas de fluidos ha sido estudiado desde que Euler en 1755 dedujo la ecuación fundamental de las turbomáquinas. Estos estudios se han centrado en tres vertientes: , la y con el desarrollo de la ciencia de la computación y avance en la tecnología se introduce la tercera herramienta de estudio:

Las centrales hidroeléctricas constituyen en el panorama energético mundial una alternativa segura, fiable y ecológica, debido a que basan en la utilización de una energía natural renovable como lo es el agua. Venezuela en particular depende energéticamente en un 70 % aproximadamente de este tipo de centrales, la mayoría localizada en el Estado Bolívar, sobre el cauce del río Caroní. Estas centrales utilizan turbinas hidráulicas como turbomáquina capaz de transformar parte de la energía disponible en el salto hidráulico de la represa en energía mecánica que acciona un generador eléctrico. Dichas turbomáquinas presentan problemas operativos cuando dicho salto es insuficiente y uno de ellos es el desgaste abrasivo producido por el fenómeno de cavitación.

En el orden de estas dos ideas, la mecánica de fluidos presenta herramientas o más bien técnicas experimentales y protocolos de diseño para ensayar las turbinas hidráulicas y así generar los ábacos o curvas características que permitan su selección e instalación, pero estos bancos de ensayos son muy costosos y dado el auge que ha tenido el desarrollo de los procesadores de computadoras, la mecánica de fluidos también se ha valido en los últimos años de la simulación de estos ensayos y estudios de la hidrodinámica del campo de flujo, con la finalidad de predecir el comportamiento y estudiar fenómenos asociados a las propiedades de presión, densidad y temperatura, como la cavitación..

En el presente trabajo se pretende simular mediante la dinámica de fluidos computacional CFD, el campo de flujo a través del dominio fluidizado del rotor de

una turbina hidráulica tipo Kaplan y determinar las condiciones de contorno que permitirían la aparición de la cavitación. El trabajo consta de los siguientes capítulos:

**Capítulo I:** Explica todo lo relacionado al planteamiento y formulación del problema, además de los objetivos a alcanzar en este proyecto, así como también las limitaciones que se presentan al momento de solucionar el problema.

**Capítulo II:** Se refiere a toda la terminología y conceptos necesarios que servirán de base para el desarrollo del estudio, además de un breve resumen sobre los antecedentes relacionados con la investigación.

**Capítulo III:** Consta de las distintas fases metodológicas a emplear en el desarrollo de las estrategias, que son establecidas para cumplir con los objetivos propuestos.

**Capítulo IV:** Detalla los resultados obtenidos, por medio de gráficas y figuras así como sus respectivos análisis, del proceso de simulación del campo de flujo a través del lecho fluidizado del rotor de la turbina.

El trabajo aquí presentado, está estructurado de tal manera que el lector pueda ir adquiriendo los conocimientos básicos que le permitirán entender a cabalidad la tecnología referida y las herramientas a usar. Sin embargo, cabe destacar que, si el lector es lo suficientemente conocedor del tema, perfectamente puede obviar los capítulos que contengan información que considere ya conocida, y continuar con los aspectos que crea interesantes sin que se pierda la linealidad o coherencia de la información que se desea mostrar.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del problema

El uso de la energía hidráulica no es nada nuevo y se remonta a más de 2000 años atrás, pero su desarrollo fue lento por espacio de 18 siglos, por motivo de que las instalaciones debían situarse cerca de ríos; en comparación a las máquinas de vapor que se podían instalar en cualquier lado.

La evolución y desarrollo posteriores en cuanto al uso, no sólo de la energía gravitacional sino también de la variación de la cantidad de movimiento (principio de Euler) significó el aumento cada vez mayor de la velocidad de rotación y de su eficiencia como máquinas de fluidos, con el fin de conseguir potencias específicas más altas, lo que permitiría generación eléctrica a más bajo costo. Con la evolución de la tecnología de la transmisión eléctrica, se procedió al desarrollo de las plantas hidroeléctricas y, por consiguiente, de las turbinas hidráulicas.

En la actualidad, existen varios tipos de turbinas hidráulicas de flujo axial, pero solo las turbinas Kaplan resaltan al tener la necesidad de trabajar en un entorno con caudales muy fuertes y en donde la corriente no provenga de alguna fuente elevada, además, son las más comunes entre las turbinas tipo hélice y las más utilizadas en centrales hidroeléctricas para la generación de energía eléctrica.

Gran parte del desempeño de las turbinas hidráulicas tipo Kaplan, se ve sumamente afectado por el fenómeno de la cavitación, el cual perjudica y desgasta el interior de la turbina, debido a las burbujas que se forman por la disminución de presión, asumiendo forma de toroide e impactando la superficie interna al aumentar la presión, lo cual produce una caída de la eficiencia, incluso daños parciales en el equipo, acortando su vida útil y hasta su avería total. Por ello es sumamente importante su estudio, que puede hacerse mediante la aplicación de modelos matemáticos y ecuaciones, o por medio de bancos de flujo, que consiste en la

instalación del equipo bajo condiciones específicas, asignadas por los investigadores. El problema es que estos métodos nos limitan a solo poder analizar los fenómenos determinados por modelos algebraicos, como también acarrear un gran costo en su implantación y mantenimiento. Por consiguiente, es vital realizar un estudio eficaz por medio de la dinámica de flujos computacional (CFD) del fenómeno de la cavitación, que está presente en el interior de las turbinas tipo Kaplan cuando un fluido pasa a través de ellas. De este modo, por medio de la simulación computacional, podremos apreciar dicho fenómeno y los problemas que esté presente en el interior de la turbina, y puedan afectar de forma permanente el impulsor de la máquina y otros elementos el cual lo constituyen, también visualizar como esto provoca una baja eficiencia y un bajo desempeño en su funcionamiento, fenómeno que bien podría estudiarse en bancos de ensayos, pero los costos en recursos financieros, humanos y de infraestructura que estos conllevan, no permite la utilización de los mismos, ni siquiera a las empresas fabricantes que tienen un itinerario relativo a la producción y no a la prestación de servicios para ensayos particulares.

## **1.2 Formulación del problema**

¿Cómo se podría simular utilizando la técnica de aproximación numérica de la dinámica de fluidos computacional CFD por sus siglas en inglés, el fenómeno de cavitación en turbinas hidráulicas tipo Kaplan en regímenes de flujo estacionario?

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 Objetivo general**

Simular mediante CFD el fenómeno de cavitación en turbinas hidráulicas tipo Kaplan

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Investigar acerca de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de una turbina hidráulica tipo Kaplan.

Seleccionar una turbina real e identificar sus características geométricas con la finalidad de modelarla mediante una herramienta (CAD)

Simular el campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD)

Obtener los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático.

#### **1.4 Justificación**

En la actualidad ha crecido rápidamente el uso de herramientas computacionales, aunado a eso, la velocidad de procesamiento de datos también ha evolucionado rápidamente, evento que ha facilitado el estudio de muchos temas importantes en las distintas ramas de la ingeniería, es por eso que se pretende ampliar el campo de la dinámica de fluidos y turbomáquinas visto en el pensum de Ingeniería Mecánica de la Universidad de José Antonio Páez por medio de la utilización de estas herramientas, realizando más aportes de trabajos de grado relacionados con técnicas numéricas computacionales. Estas herramientas permiten evaluar las ecuaciones de dinámica de fluidos que no se pueden trabajar analíticamente debido a sus complejidades matemáticas, por lo tanto, aplicar esta investigación, permite predecir las propiedades de flujo con más detalles y obtener resultados más próximos a la realidad del comportamiento del fluido a través del rotor de la turbina hidráulica tipo Kaplan, evitando así realizar los gastos de construcción de un banco experimental.

Una utilidad de las herramientas CFD, es que se tiene la posibilidad de excluir físicamente el equipo que se desea estudiar y obtener variables físicas en cualquier punto del espacio geométrico, solo basta con su dimensionamiento en un software de diseño computacional. De esta manera se obtienen beneficios económicos en todos los ámbitos de estudio.

#### **1.5 Limitaciones**

Durante la investigación se presentarán las siguientes limitantes:

El pensum carece de una materia que se enfoque en el estudio de la dinámica de fluidos computacional, lo que puede ocasionar impedimentos al utilizar la herramienta para la resolución de modelos numéricos adecuados.

La gran cantidad de tiempo que se invierte haciendo las simulaciones, las cuales se realizarán de manera que se puedan culminar en los tiempos establecidos para elaborar la investigación.

Se precisa la creación de un modelado geométrico preciso y un mallado de buena calidad, lo cual puede traer complicaciones al momento de la creación.

## **1.6 Alcance**

Esta investigación solo se encargará del estudio de la cavitación en turbinas hidráulicas tipo Kaplan, esto en virtud de que, para el tiempo establecido, no se pretende indagar en otros tipos de turbinas, inestabilidades termohidrodinámicas y condiciones de operación. Tampoco se estudiarán los cambios que puedan sufrir las propiedades del fluido por la presencia de elementos externos, como lo son la transferencia de calor generada por el medio donde se encuentra la turbina, por lo que, en todo momento, se considerará flujo estacionario sin transferencia de calor y sin cambio de energía potencial gravitatoria, así como también. El estudio de la simulación numérica solo será referido para un modelo matemático específico, así como los resultados obtenidos solo serán aplicables para campos de flujo a través del lecho fluidizado del rotor de la turbina.

Los resultados obtenidos serán arrojados en forma de datos y mediante el uso de gráficos experimentales de las variables que describen el fenómeno.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes de la investigación

Las investigaciones en el análisis numérico y en el desarrollo de modelos computacionales para el estudio de la dinámica de fluidos son de data reciente, y es muy escasa la cantidad de investigadores que han incursionado en esta área, siendo aún mucho menor el desarrollo de investigaciones en función del análisis y comportamiento numérico/computacional del fenómeno de cavitación en turbinas hidráulicas tipo Kaplan; muchos estudios realizados hasta ahora se basan en el comportamiento de dichas turbinas en una aplicación industrial o entorno determinado. Sin embargo, se pueden destacar:

Rivetti A., Lucino C., Torres J. y Liscia S. (2013). en su artículo titulado **“Modelación en CFD de una turbina Kaplan y comparación con resultados experimentales”** utilizando un software comercial (ANSYS® CFX 13.0) que utiliza el método de volúmenes finitos, comparan el rendimiento obtenido experimentalmente en el modelo físico contra el calculado por CFD. De manera cualitativa comparan la presencia de cavitación observada en el modelo físico sobre los álabes del rodete con los diagramas de presión obtenidos en CFD. La modelación matemática fue efectuada tanto en escala prototipo como en escala de modelo físico para idénticas condiciones de operación. El dominio fluido considerado incluye todos los componentes de la turbina, cámara espiral, pre-distribuidor, distribuidor, rodete y tubo de aspiración. La modelación matemática fue llevada a cabo para una condición de régimen estacionario. El error relativo de estimación del rendimiento en la comparación modelo físico respecto al matemático fue de 1,6.

Así mismo, Nilsson H. y Davidson L. (2012), en su artículo **“A Numerical comparison of Four Operating Conditions in a Kaplan Water Turbine, Focusing on Tip Clearance Flow”** publicado en the proceedings of the 20<sup>th</sup> IAHR Symposium, Charlotte, North Carolina, U.S.A., utilizaron un código CFD de volumen finito de

bloques múltiples CALC-PMB (Paralelo MultiBlock) para realizar los cálculos del flujo turbulento a través de una turbina hidráulica de flujo axial tipo Kaplan. Los cálculos incluyen tanto las paletas guías como el tubo de aspiración. El cálculo de las condiciones límites de entrada de las variables del flujo fueron realizados en el área circunferencial de la paleta guía y se computaron cuatro condiciones de operación diferentes, determinándose que los resultados numéricos concuerdan con los realizados por el fabricante. Este trabajo se centró en la separación del flujo en la punta de los álabes, lo que reduce la eficiencia de la turbina en alrededor del 0,5%.

Por último, Motycak L., Skotak A. y Kupcik R. (2016), en el trabajo titulado **“Kaplan turbine tip vortex cavitation - analysis and prevention”** publicado en la 26<sup>th</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Beijing, China, se enfoca en un tipo de cavitación en las turbinas tipo Kaplan: la cavitación de vórtice. Para una descripción detallada del vórtice, se utiliza el análisis de CFD. Sobre la base de este análisis, es posible estimar la intensidad del núcleo del vórtice de cavitación, el peligro de posibles picaduras en la superficie del álabe y la cavidad de la cámara de la voluta. En el documento, también se describen las formas de evitar el efecto de picadura como el cambio de geometría de los álabes guías, la dimensión de la del espesor del álabe y, finalmente, la instalación de los “flaps” anticavitación. El conocimiento de la forma y la intensidad del vórtice ayuda a diseñar los flaps anticavitación de manera más sofisticada. Después de todo, se comparan los resultados de las pruebas modelo la turbina tipo Kaplan con o sin flaps anticavitación y los resultados del análisis de CFD.

## **2.2 Bases teóricas**

De acuerdo con Arias F. (2012), “Las bases teóricas implican un desarrollo amplio de los conceptos y proposiciones que conforman el punto de vista o enfoque adoptado, para sustentar o explicar el problema planteado” (p.107). Por lo tanto, la correcta realización de las bases teóricas permitirá no solo obtener un sustento sobre el cual se podrá realizar el apropiado y acorde análisis de resultados, sino que también

ayudará a explicar la problemática a partir de un conjunto de teorías y supuestos ya establecidos y publicados.

### **2.2.1 Máquinas hidráulicas**

La máquina es un ente transformador de energía. Una máquina absorbe energía y restituye energía de otra clase. Por tanto, una máquina hidráulica es un dispositivo capaz de convertir energía hidráulica en energía mecánica, pueden ser motrices (turbinas), o generatrices (bombas). En el estudio de las turbomáquinas hidráulicas no se tienen en cuenta efectos de tipo térmico, aunque a veces habrá necesidad de recurrir a determinados conceptos termodinámicos, todos los fenómenos que se estudian serán en régimen permanentes, caracterizados por una velocidad de rotación de la máquina y un caudal, constantes. Acá el fluido que intercambia su energía no varía sensiblemente de densidad en su paso a través de ella, por lo cual en la misma se hace la hipótesis de que la densidad es constante. En una máquina hidráulica, el agua intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución que gira alrededor de su eje de simetría; este mecanismo lleva uno o varias ruedas, (rodetes o rotores), provistas de álabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua. Los métodos utilizados para su estudio son, el analítico, el experimental, el análisis dimensional y numérico.

El método analítico, se fundamenta en el estudio del movimiento del fluido a través de los álabes, según los principios de la mecánica de fluidos.

El método experimental, se fundamenta en la formulación empírica de la hidráulica, y la experimentación.

El método de análisis dimensional, ofrece grupos de relaciones entre las variables que intervienen en el proceso, confirmando los coeficientes de funcionamiento de la turbomáquinas, al igual que los diversos números adimensionales que proporcionan información sobre la influencia de las propiedades del fluido en movimientos a través de los órganos que las componen. El método numérico, es el método más reciente y se fundamenta en la mecánica de fluidos,

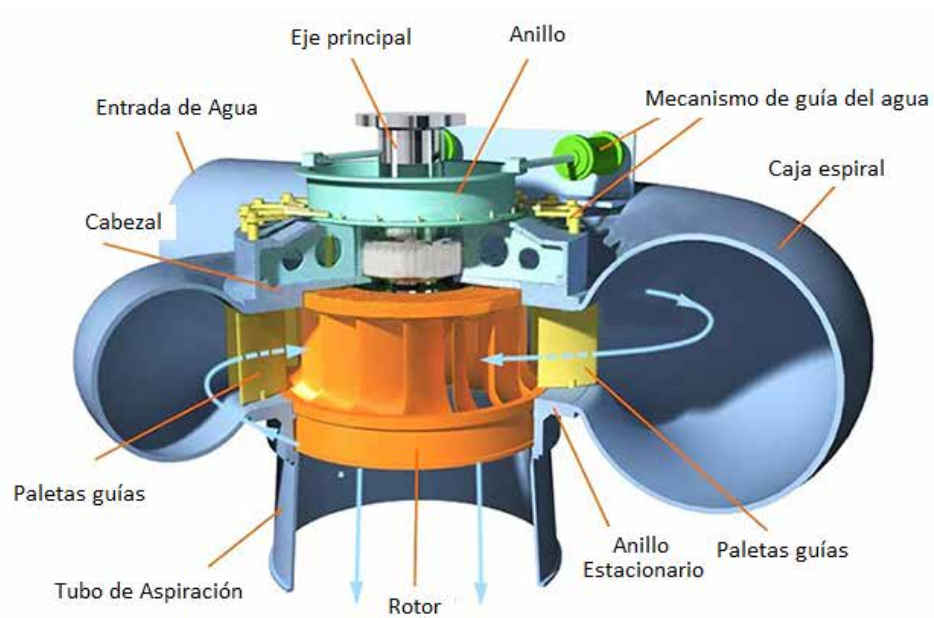
mediante las ecuaciones de momento, continuidad y energía, complementado con la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales aplicados dominios establecidos.

### 2.2.2 Turbinas hidráulicas.

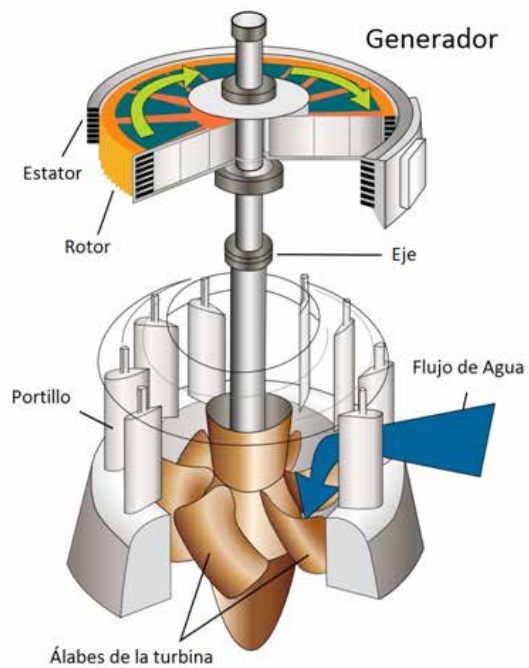
Una turbina hidráulica motora es un sistema mecánico que permite transformar continuamente la energía hidráulica (cinética + presión) presente en un fluido en energía mecánica, modificando la energía total del caudal de fluido que las atraviesa, la cual posteriormente puede ser transformada en energía eléctrica. El funcionamiento de la turbina se basa en un mecanismo rotativo con álabes o paletas (perfiles hidrodinámicos) conectado a un eje, el cual interactúa con el fluido a través del principio de conservación de cantidad de movimiento angular. En las turbomáquinas llamadas también máquinas de corriente, los cambios en la dirección y valor absoluto de la velocidad del fluido juegan un papel esencial. El órgano transmisor de energía (conocido como rodete, rotor o impulsor) se mueve siempre con movimiento rotativo. El principio de funcionamiento de las turbomáquinas es la ecuación de Euler. Son máquinas dinámicas y ocurren cambios de velocidades importantes dentro de ellas. Existen muchos tipos de turbinas hidráulicas, pero las más utilizadas se muestran en la figura 1 las cuales son: a) Pelton, b) Francis y c) Kaplan.



a) Turbina tipo Pelton



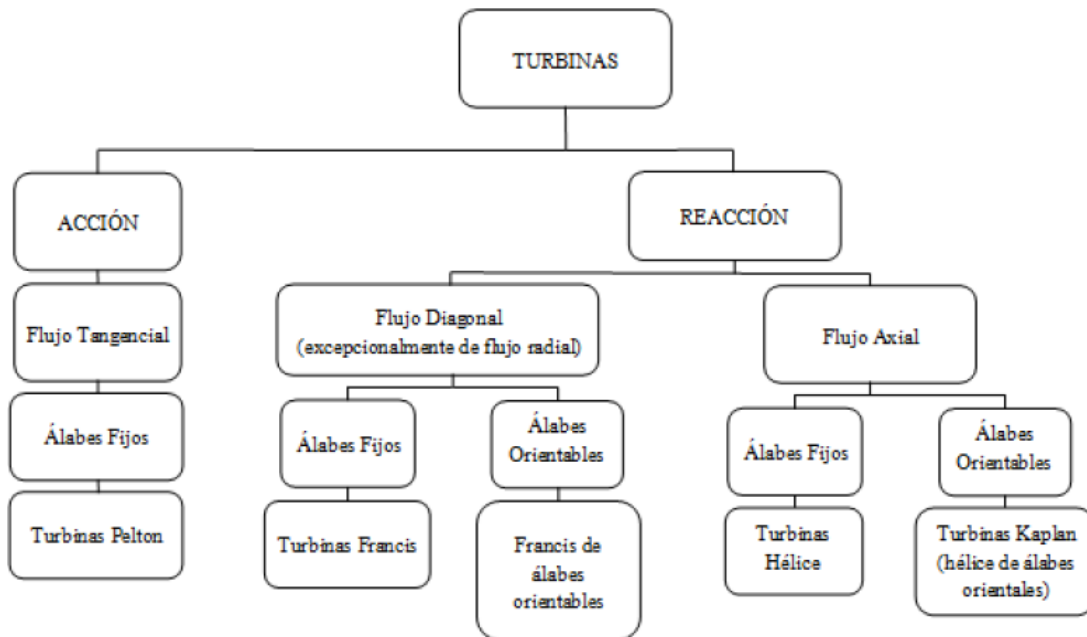
b) Turbina tipo Francis



c) Turbina tipo Kaplan

**Figura 1.** Tipos de turbinas a) Pelton, b) Francis y c) Kaplan  
Fuente: García y Guillen – UC (2015)

Las turbinas hidráulicas son rara vez radiales. La turbina Francis frecuentemente es de flujo mixto. La turbina Kaplan es de flujo axial. En el esquema siguiente de la Figura 2, se presenta una estructura básica que clasifica las turbinas.



**Figura 2.** Clasificación de las turbinas hidráulicas

Fuente: García y Guillen – UC (2015)

### 2.2.3 Elementos constructivos de las turbinas

Toda turbina consta básicamente de las siguientes partes elementales:

Transporta la energía mecánica desde la máquina hasta el generador.

. Es el componente móvil y consiste en una rueda con paletas (álabes) o cucharas que rota solidaria con el eje, a través del cual fluye el fluido continuamente intercambiando energía por medio del principio de conservación de cantidad de movimiento angular. La energía disponible en el líquido se transfiere al eje por medio del rotor, y el momento de torsión que resulta, transferido por el eje giratorio, puede impulsar un generador eléctrico.

Corona con paletas o álabes fijos a la carcasa. No existe intercambio de energía con el fluido. Su función es controlar la dirección del fluido y transformar la presión del fluido en velocidad, es decir, actúa como tobera.

Envolvente de la máquina. Puede actuar como estator sin álabes en máquinas radiales y mixtas.

#### **2.2.4 Turbinas tipo Kaplan**

Son consideradas como turbomáquinas hidráulicas típica de reacción y de flujo axial que tiene verdadera importancia en la actualidad. La Kaplan es una turbina de hélice con álabes ajustables mediante un servomotor hidráulico instalado en el interior del cubo del rodete, de forma que la incidencia del agua en el borde de ataque del álabe pueda producirse en la condición de máxima acción, cualesquiera que sean los requisitos de caudal o de carga. Se logra así mantener un rendimiento elevado a diferentes valores de la potencia, característica importantísima para un rotor de hélice, pues es una de las diferencias más notables que se advierten en las turbomáquinas de hélice de álabe fijo, en las cuales la incidencia del agua sobre el borde de ataque se produce bajo ángulos inapropiados, dando lugar a separación o choques, que reducen fuertemente el rendimiento de la unidad. Puede, sin embargo, justificarse el empleo de turbinas de hélice de álabe fijo en aquellas instalaciones en las que no sea muy sensible la variación de potencia.

La turbina Kaplan debe su nombre al ingeniero Víctor Kaplan (1876-1934), profesor de la Unidad Técnica de BRNO (Checoslovaquia), quien concibió la idea de corregir el paso de los álabes automáticamente con las variaciones de la potencia. Una técnica constructiva de las turbinas hidráulicas poco desarrollada al comienzo del siglo, hacía concebir la idea de Kaplan como irrealizable. Pero con el avance del siglo progresaba el desarrollo tecnológico, y la construcción de la turbina Kaplan fue imponiéndose, primero en Europa y después en el mundo entero. Incluso va invadiendo el campo de cargas medias en el que la Francis parecía ser insustituible.

Las turbinas Kaplan son generalmente utilizadas en centrales hidroeléctricas construidas en ríos donde se manejan grandes caudales en pequeños saltos. En la

actualidad, la aplicación está en una gama de cargas que varía aproximadamente de 1 metro a 90 metros, si se incluye a las turbinas tubulares o de bulbo, que también son de hélice con paso variable.

Estas turbinas, además de mantener buen rendimiento de la regulación del gasto o con las oscilaciones de la carga por variación de la cota de nivel del embalse, permite también aumentar el caudal por unidad, para una determinada carga y por tanto la potencia, con lo cual se puede reducir el número de unidades en ciertos aprovechamientos hidráulicos y en consecuencia disminuir los costos de la primera instalación pero, la doble regulación de una turbina Kaplan hace que ésta sea más costosa que una turbina Francis de igual potencia, por lo que se utilizan en aquellas instalaciones donde se desee conseguir rapidez de giro y máxima facilidad de regulación. La velocidad específica de la turbina Kaplan es alta, en virtud de que la carga es pequeña con relación al caudal, el cual, como máquina axial, es muy grande. En el sistema métrico, la velocidad específica llega a variar de  $n_s=300$  a  $n_s=1100$ , cuya equivalencia en el sistema inglés es de  $N_s=70$  a  $N_s=250$  aproximadamente, aunque valores de  $N_s$  inferiores a 100 son pocos frecuentes. El número de álabes de una turbina Kaplan varía de 4 a 9, correspondiendo a mayor velocidad específica menor número de álabes. Según Finniecombe, que ha recopilado datos de diferentes turbinas hidráulicas, las velocidades de rotación varían de 50 a 200 RPM; las velocidades tangenciales en el extremo del álabe están entre 19.5072 y 37.7952 m/s (64 y 124 ft/s); las velocidades de caída ( $V=$  ) son de 11,2776 a 24,9936 m/s (37 a 82 ft/s); las velocidades axiales ( $V_a$ ) de 6,7056 a 10,9728 m/s (22 a 36 ft/s).

#### **2.2.4.1 Principales componentes de la turbina Kaplan**

La turbina hidráulica tipo Kaplan posee varios componentes fijos y móviles algunos de los cuales se mencionan a continuación:

facilita la variación de la cantidad de movimiento del agua que fluye a la corona de los álabes directrices, transforma total o parcialmente la presión en velocidad, y minimiza las pérdidas del fluido en su

trayecto. Adoptan forma de caracol de sección transversal con geometría variable, en espiral o semi-espiral dependiendo de los casos de estudio. Las paredes de las cajas semiespirales son construidas de concreto armado y la sección transversal es en general rectangular; mientras que, en las cajas espirales las paredes son de acero reforzado y la sección trasversal es circular, esto en general debido a la gran capacidad de flujo que admite se puede ver a continuación en la Figura 4.

se encuentra luego de la cámara o voluta, consiste en una corona de álabes fijos radiales que sirve para direccionar el flujo de manera favorable antes de entrar a la corona de los álabes del distribuidor.

regula el gasto de admisión por un determinado número de y además imprime al agua el giro necesario, es decir transformando presión en velocidad y uniformizar las velocidades del flujo en una zona de vórtices libres que precede al rotor, propiciando el ataque adecuado del agua a los álabes para una transferencia de energía eficaz.

Dirigen el líquido al rodete con un mínimo de pérdidas y transforman parte de la energía de presión en energía cinética. El hecho de que los álabes se puedan orientar permite la regulación de la turbina, al poder variar el caudal que llega al rodete. Los álabes del distribuidor se ajustan, de acuerdo a las necesidades de la potencia.

Son los elementos mecánicos a base de servomecanismos, palancas y bielas que constituyen el equipo de regulación de la turbina y está gobernado por el regulador de velocidad.

es el elemento rotativo de la máquina, la pieza fundamental de la turbina. El rodete de las turbinas Kaplan tiene forma de hélice, está constituido por dos piezas fundamentales: un robusto , cuyo diámetro es del orden del 40% al 50% del diámetro total al extremo de los álabes, en el cual van empotrados los álabes encargados de efectuar la transferencia de energía del agua al eje de la unidad. La robustez del cubo se justifica no solo por razones de resistencia mecánica, sino también porque debe alojar en su interior el mecanismo de reglaje del

paso de los álabes del rotor es decir el que le da el movimiento. Los álabes del rotor que tienen el perfil de ala de avión y desarrollo helicoidal. El perfil de ala permite obtener una acción útil de agua sobre el álabe en el movimiento, pueden adaptarse a las condiciones de carga y caudal a las que opere la central, tal como se muestra en la Figura 3.

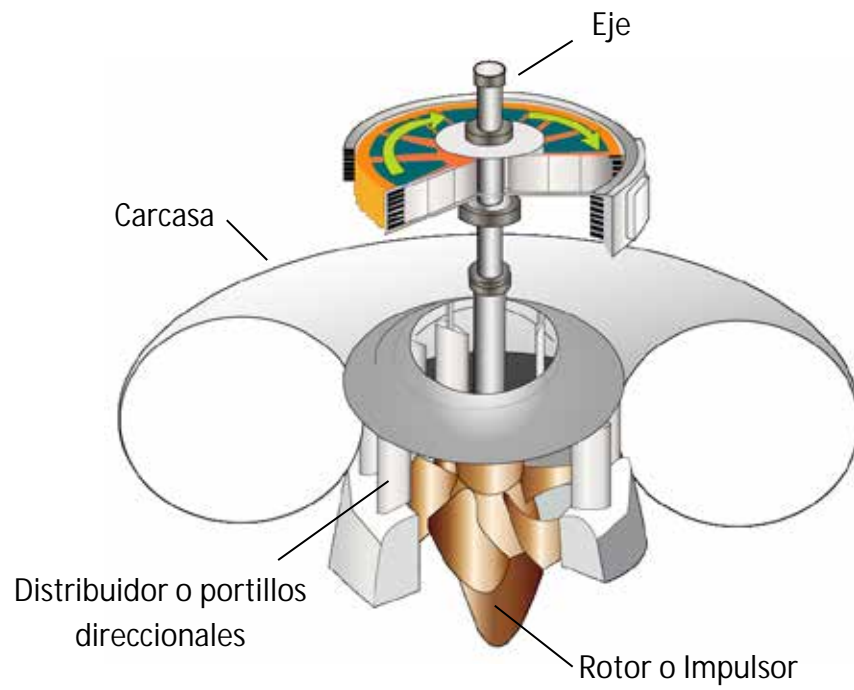


**Figura 3.** Rotor de turbina Kaplan

Fuente: Mier y Terán (2019)

**El número de álabes ( )** que tiene un rodete de las turbinas Kaplan está relacionado con velocidad específica, de acuerdo a la tabla 1.

es un conducto por donde descarga el fluido, generalmente con ensanchamiento progresivo, recto o acodado, que sale del rodete y la conduce hasta el canal de fuga, permitiendo recuperar parte de la energía cinética a la salida del rodete para lo cual debe ensancharse, por su forma aerodinámica reduce la turbulencia del flujo de agua, reduciendo de este modo las fluctuaciones del caudal. Si por razones de explotación el rodete está instalado a una cierta altura por encima del canal de fuga, un simple difusor cilíndrico permite su recuperación, que de otra forma se perdería, si la turbina no posee tubo de aspiración, se la llama de escape libre, tal y como se aprecia en la Figura 4.



**Figura 4.** Elementos constitutivos de una turbina hidráulica tipo Kaplan.  
Fuente: García y Guillen – UC (2015)



**Figura 5.** Turbina Kaplan vista del corte de perfil  
Fuente: Mier y Terán (2019)

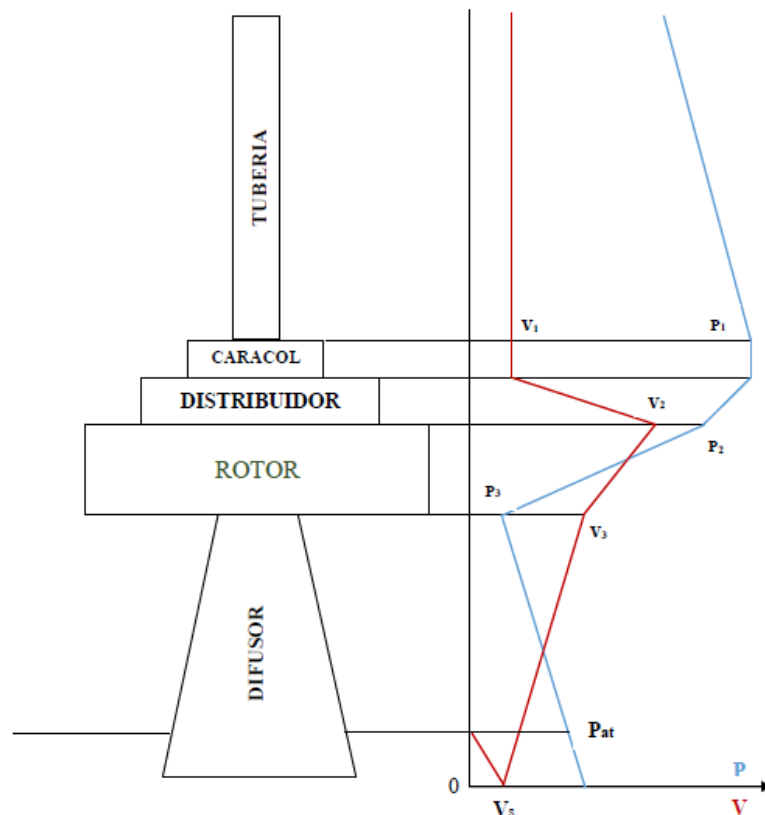
**Tabla 1.** Número de álabes de las turbinas Kaplan en función de la velocidad específica de rotación  $n_s$ .

$n_s$	$Z$
De 400 a 500	7-8
De 500 a 600	6
De 600 a 750	5
De 750 a 900	4
Mayor de 900	3

### 2.2.6 Variación de presión y velocidad del agua e turbinas a reacción

La variación de la presión y de la velocidad del agua a través de los diferentes órganos que componen una turbina de reacción puede verse en la Figura 6. Se incluye un tramo del canal de toma o tubería de presión que alimenta la máquina, aunque en realidad, éstos no forman parte de la unidad. Lo que se quiere mostrar es la forma en que va aumentando la presión del agua hasta alcanzar el caracol, mientras la velocidad permanece constante en la tubería, siempre que el diámetro permanezca constante y el flujo estable. La velocidad en la tubería de presión es del orden de 4.5 m/s a 6 m/s. La presión aumenta debido a la reducción en la carga de posición o energía potencial a medida que se acerca al caracol, reduciéndose la carga total del flujo en la tubería de presión, sólo por las pérdidas inherentes a éste. En el caracol, ducto de alimentación de sección decreciente, produce efecto tobera sobre la velocidad absoluta y a través de portillos direccionales, pasa el agua seguidamente al distribuidor, donde se produce una aceleración que incrementa la: energía cinética, al mismo tiempo que cae la presión y se impone al líquido el giro necesario para la transferencia de energía al rotor. En seguida ataca el agua a los álabes del rotor con una velocidad absoluta  $v$  y una presión estática  $p$ . El agua en su paso por entre los álabes cede casi toda su energía al rotor, conservando sólo valores residuales  $v_r$  y  $p_r$  a la salida, para continuar su curso hacia el tubo de desfogue o difusor, en el cual el agua disminuye aún más su energía dinámica, incrementándose ligeramente la presión.

El agua termina su recorrido por el ducto cerrado, que se inició en el nivel de aguas arriba en el embalse, descargando el socaz o bajo cauce del río a la presión atmosférica. Como  $\rho g h$  es menor que la presión atmosférica, el tubo de desfogue permite aumentar el gradiente de presión en el rotor, en el valor  $(P_1 - P_2)$ . En las Turbinas existen canales móviles de flujo en el rotor o impulsor y canales fijos de flujo en el estator. En TM los canales fijos y móviles actúan como toberas para la velocidad absoluta y relativa respectivamente. El fluido sufre un proceso de expansión. Los canales de flujo deben actuar como toberas. Se debe hacer notar que las líneas en la Figura 6 no representan carga piezométrica ni carga de velocidad, sino solamente la forma cualitativa de variación de la presión y de la velocidad.



**Figura 6.** Variación de la presión y de la velocidad del agua a través de los diferentes órganos que componen una turbina de reacción.

Fuente: Fuente: García y Guillen – UC (2015)

### **2.2.7 Análisis del flujo entre el distribuidor y el rotor de turbinas axiales tipo Kaplan.**

En una turbina Kaplan, el agua, procedente de la cámara de alimentación o ducto de escurrimiento, se presenta radial a nivel del distribuidor y guiada por los álabes del distribuidor, avanza y gira en una zona de vórtices libres, que es la zona existente entre el distribuidor y el rotor, hasta alcanzar a este último en la dirección axial, atacando el álabe con una velocidad absoluta  $V_{1u}$  que es variable en magnitud y dirección para cada punto del borde de ataque del álabe, debido al cambio en la posición radial que hace que varíe la velocidad tangencial  $V_{1t}$  y la componente tangencial de la velocidad absoluta  $V_{1u}$ . Finalmente el agua avanza al tubo de desfogue. La zona de acción del rotor se encuentra comprendida generalmente entre dos superficies cilíndricas coaxiales en las turbinas de hélice y entre dos superficies esféricas concéntricas en las turbinas Kaplan, para permitir en este caso el pivoteo de los álabes. En una posición radial, la velocidad tangencial  $V_{1t}$  conocida también como velocidad de arrastre y la velocidad relativa respecto al eje  $V_{1r}$ , cierra el triángulo vectorial  $V_{1u}$ . La velocidad relativa  $V_{1r}$  debe incidir sobre el álabe de forma que se logre una máxima acción del agua, evitando separación o choques, que reduzcan el rendimiento. La magnitud de la componente axial  $V_{1u}$  se conserva por criterio de diseño.

La velocidad absoluta a la salida  $V_2$  se procura que sea axial o con una componente giratoria mínima, a fin de tener un buen desfogue y para reducir su magnitud, aumentando el coeficiente de utilización. Como la velocidad tangencial del álabe  $V_{2t}$  calculada en el radio medio es constante, los dos puntos de entrada y salida del rotor están a la misma distancia del eje, se tendrá que diseñar el borde de fuga de forma que la componente relativa del agua  $V_{2r}$  cierre el triángulo vectorial con esta velocidad  $V_{2t}$  tangente al álabe. Esta disposición del álabe para una correcta incidencia del agua, es la correspondiente a las condiciones de diseño de toda turbina

de hélice. En el caso de la Kaplan, se consigue, como ya se dijo, para diversas condiciones trabajo, en virtud del cambio de paso que puede operarse en los álabes. El diseño de los álabes suele hacerse para el 80% de la capacidad de gasto de la turbina, ya que en estas condiciones se favorece el rendimiento global del álabe en las diferentes condiciones de carga parcial o sobrecarga, en las que con frecuencia se ve obligada a trabajar la máquina. Para las condiciones de diseño la apertura del ángulo del distribuidor suele ser de 45°, pudiendo variar entre 20° y 50° en términos generales.

## **2.2.8 Fundamentos de mecánica de fluidos aplicado a las turbomáquinas**

### **2.2.8.1 Primera forma de la ecuación de Euler**

La variación respecto al tiempo del momento cinético del sistema es igual al momento resultante de las fuerzas que actúan sobre él, incluyendo fuerzas de contacto o de superficies y las fuerzas de campo, como se muestra en la ecuación 1.

$$\frac{dM}{dt} = \sum F \quad (1)$$

Si se tiene flujo permanente entonces:

$$\frac{dM}{dt} = 0 \quad (2)$$

Luego de hacer las simplificaciones se obtiene:

$$\sum F = 0 \quad (3)$$

Es positivo (+) cuando las turbomáquinas son generadoras, y es negativo (-) las turbomáquinas son motoras (caso turbinas)

La ecuación 2 recibe el nombre de ecuación fundamental de las Turbomáquinas o ecuación de Euler, y es una ecuación independiente del fluido de trabajo y válida por tanto para fluidos en régimen compresible o incompresible. Otra forma de escribirla es:

$$\sum F = 0 \quad (4)$$



$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r v_r \right) + \frac{1}{r} \frac{d}{d\theta} \left( v_\theta \right) = 0 \quad (11)$$

igualando (10) con (11) y simplificando se obtiene:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r v_r \right) + \frac{1}{r} \frac{d}{d\theta} \left( v_\theta \right) = 0 \quad (12)$$

de donde se deduce que:

$$v_r = -\frac{v_\theta}{r} \quad (13)$$

Al expresar la velocidad tangencial como  $v_\theta = v_\theta(r)$ , se obtiene la Ecuación de Bernoulli para campos centrífugos:

$$\frac{1}{2} v_\theta^2 - \frac{v_\theta^2}{2r} = C \quad (14)$$

### 2.2.9 Modelación matemática

A continuación, se presentan los modelos matemáticos utilizados para realizar la simulación del campo de flujo, a través de la geometría, basados en las leyes de conservación.

#### 2.2.9.1 Ecuación de la continuidad

En forma diferencial la ecuación de la continuidad se puede expresar como:

$$\frac{D}{Dt} \left( \frac{1}{\rho} \right) + \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (15)$$

donde  $\nabla \cdot \mathbf{v}$  y  $\frac{D}{Dt}$  es la divergencia de la velocidad y el termino  $\frac{D}{Dt}$  en realidad expresa la derivada material  $D/Dt$ , esta forma de la ecuación de continuidad no hace referencia a ningún sistema de coordenadas en específico, es la forma para expresarla empleando diversos sistemas de coordenadas, en el caso de un flujo incompresible, en el que la densidad de una partícula de fluido no cambia durante su trayecto  $D\rho/Dt=0$ , la ecuación (15) se expresa en forma diferencial y vectorial respectivamente:

$$\tau_{xy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (16)$$

$$\tau_{yz} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (17)$$

### 2.2.9.2 Ecuación de momentum

Una forma de escribir la segunda ley de Newton para un fluido es:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \nabla p \quad (18)$$

Donde el esfuerzo cortante  $\tau_{ij}$ , está relacionado con la velocidad de deformación por:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (19)$$

Las ecuaciones diferenciales de momentum se pueden escribir para flujos incompresibles, utilizando la derivada material:

$$\rho \frac{D u}{Dt} = \mu \nabla^2 u - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (20)$$

$$\rho \frac{D v}{Dt} = \mu \nabla^2 v - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (21)$$

$$\rho \frac{D w}{Dt} = \mu \nabla^2 w - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (22)$$

Y en forma vectorial:

$$\rho \frac{D \mathbf{u}}{Dt} = \mu \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p \quad (23)$$

Se ha añadido tres ecuaciones adicionales a la ecuación de continuidad para obtener cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas,  $u$ ,  $v$ ,  $w$  y  $p$ . Con las condiciones de frontera iniciales apropiadas, es posible obtener una solución para el campo de velocidad y de presión para el flujo incompresible.

### 2.2.9.3 Ecuación de la energía total

Por su parte para tomar en cuenta las interacciones de energía se usa la ecuación:

$$\text{-----} \quad \text{---} \quad (24)$$

Donde es la entalpía total, relacionada con la entalpía estática  $h(T, p)$  por la siguiente ecuación:

$$\text{---} \quad (25)$$

El término representa el trabajo debido a los esfuerzos viscosos y es llamado término de trabajo viscoso.

El término representa el trabajo debido a las fuentes de momentum externo y se desprecia en la actualidad.

### 2.2.9.4 Ecuación de navier-stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones que definen el comportamiento dinámico de un fluido. Derivan de aplicar los principios de conservación de la mecánica y de la termodinámica al fluido, de donde se obtiene una formulación integral que generalmente se suele transformar en una formulación diferencial más práctica. Existen diferentes formulaciones para estas ecuaciones, en función del problema que se desea resolver.

Muchos fluidos exhiben una relación lineal entre las componentes del esfuerzo y los gradientes de velocidad. Se llaman fluidos newtonianos a tales materiales, que incluyen fluidos comunes tales como agua, aceite y aire. Si además de la linealidad se exige que el fluido sea isotrópico (las propiedades del fluido son independientes de la dirección) es posible relacionar las componentes del esfuerzo y los gradientes de velocidad empleando sólo dos propiedades del

esfuerzo-velocidad-gradiente, conocidas como ecuaciones constitutivas, se presentan en las ecuaciones:

$$\tau_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (26)$$

$$\tau_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (27)$$

$$\tau_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (28)$$

Para la generalidad de los gases, y con exactitud para los gases monoatómicos, el segundo coeficiente de viscosidad está relacionado con la viscosidad como se muestra en la ecuación:

$$\mu = \frac{2}{3}\lambda + \mu \quad (29)$$

Condición conocida como hipótesis de Stokes. Con esta relación el promedio negativo de los tres esfuerzos normales es igual a la presión, es decir:

$$-\frac{1}{3}(\tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz}) = p \quad (30)$$

Utilizando las ecuaciones 26; 27 y 28, se puede demostrar que esto siempre se cumple para un líquido en el que  $\lambda = \frac{2}{3}\mu$ , y con la hipótesis de Stokes también se cumple para un gas.

Si sustituimos las ecuaciones constitutivas en las ecuaciones diferenciales de momentum, se obtiene, utilizando las hipótesis de Stokes:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} = \rho \mathbf{f} \quad (31)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mu \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p \quad (32)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (33)$$

Donde se ha supuesto un fluido homogéneo, es decir, que las propiedades del fluido (incluida la viscosidad) son independientes de la posición. En el caso de un flujo incompresible la ecuación de continuidad permite reducir las ecuaciones anteriores como muestra las ecuaciones:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mu \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p \quad (34)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (35)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mu \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p \quad (36)$$

Éstas se denominan ecuaciones de Navier-Stokes; con estas tres ecuaciones diferenciales y la ecuación diferencial de continuidad se tienen cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas,  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , y  $p$ . Se supone que las propiedades de viscosidad y densidad del fluido se conocen. Con las condiciones de borde apropiadas, es de esperar que se puedan resolver las ecuaciones. Varias geometrías relativamente sencillas permiten soluciones analíticas; aunque para muchos flujos de interés ingenieril se han determinado soluciones numéricas.

Puesto que las ecuaciones son ecuaciones diferenciales parciales no lineales, no se puede confiar en que la solución que se obtenga se pueda reproducir realmente en el laboratorio; es decir, las soluciones no son únicas. Por ejemplo, un flujo laminar y uno turbulento pueden tener condiciones iniciales y de frontera idénticas, a pesar de que los dos flujos (las dos soluciones) son muy diferentes. Se puede expresar las ecuaciones de Navier-Stokes en forma vectorial multiplicando las ecuaciones por  $\mathbf{e}_i$  respectivamente, y sumando:

$$\mathbf{e}_i \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i^2} \right) = \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{f} \quad (37)$$

$$\mathbf{e}_i \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_i^2} \right) = \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{f} \quad (38)$$

$$(39)$$

Donde se ha utilizado el operador Laplaciano:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (40)$$

Combinando lo anterior, las ecuaciones de Navier-Stokes adoptan la forma vectorial como:

$$\rho \left( \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (41)$$

Esta forma nos permite utilizar las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando otros sistemas de coordenadas (rectangulares, cilíndricas y esféricas).

### 2.2.9 Modelo de turbulencia eddy viscosity

Una propuesta sugiere que la turbulencia se compone de pequeños remolinos que se forman y disipan continuamente, en la cual los esfuerzos de Reynolds se asumen proporcionales a los gradientes de la velocidad media. Esto define a los modelos “Eddy-Viscosity”. Esta hipótesis supone que los esfuerzos de Reynolds

pueden estar relacionados con los gradientes de velocidad promedio y la viscosidad de “Eddy”, a través de la hipótesis del gradiente de difusión. Se representan mediante:

$$- \quad (42)$$

Donde  $\mu_t$  es la viscosidad turbulenta o viscosidad de Eddy.

Análoga a la hipótesis de viscosidad de Eddy, la difusividad de Eddy es la hipótesis que afirma que los flujos de Reynolds son un escalar linealmente relacionadas con el gradiente de la media escalar como se muestra en la ecuación 103:

$$(43)$$

Donde  $Pr_t$ , el número de turbulencia de Prandtl.

Las ecuaciones anteriores sólo pueden expresar los términos de las fluctuaciones de la turbulencia en función de la velocidad promedio si la viscosidad turbulenta  $\mu_t$  se conoce, tomando en cuenta que tanto los modelos  $k - \epsilon$  y  $k - \omega$  proporcionan esta variable; sujeto a esta hipótesis, tanto la ecuación de momento promedio de Reynolds y la ecuación escalar de transporte se pueden expresar como:

$$\text{---} \quad (44)$$

Donde  $B$  es la suma de las fuerzas en el cuerpo y  $\mu_{eff}$  es la viscosidad efectiva definida en la ecuación:

$$(45)$$

$p'$  es la presión modificada definida por:

$$- \quad - \quad (46)$$

### 2.2.10 Modelo de turbulencia kappa- epsilon ( $k - \epsilon$ )

El modelo de turbulencia empleado para el flujo multifásico es una generalización del modelo  $K - \epsilon$  para una sola fase. Implementando el modelo  $K - \epsilon$

sólo para la fase continua no teniendo en cuenta los efectos de la fase dispersa sobre la turbulencia de la fase continua

$$\frac{\mu_t}{\rho} = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (47)$$

$$\frac{\mu_t}{\rho} = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (48)$$

Donde:

$k$  = energía cinética de turbulencia

$\epsilon$  = Disipación viscosa

El modelo  $k - \epsilon$  tiene cinco constantes, que garantizan la homogeneidad dimensional. Las cuales son:

$$C_\mu = 0,09, \quad C_1 = 1,44, \quad C_2 = 1,92, \quad k = 1,0, \quad \epsilon = 1,3$$

Si bien los modelos estándar de dos ecuaciones, como el modelo  $k - \epsilon$ , dan una buena predicción para muchos problemas de fluidos en ingeniería, existen otras aplicaciones para las cuales estos modelos pueden no ser los más adecuados. Entre estos se encuentran: Flujos con separación de capa límite, corrientes con cambios bruscos en la tasa promedio de los esfuerzos, flujos rotativos, flujos sobre superficies curvas. Entre las principales ventajas e inconvenientes del modelo de turbulencia kappa - épsilon son las siguientes:

### 2.2.11 Modelo de turbulencia kappa-omega $k - \omega$ .

Una de las ventajas de la formulación  $k - \omega$  es el tratamiento para zonas cercanas a la pared para cálculos con bajo número de Reynolds. El modelo no requiere la resolución de ecuaciones no lineales complejas, como en el modelo  $k - \epsilon$  y por lo tanto es más preciso y más robusto. El modelo  $k - \omega$  asume que la viscosidad turbulenta está relacionada con la energía cinética de la turbulencia, mediante la relación siguiente:

$$\dots \dots \dots (49)$$

Donde  $\epsilon$  = Rata de disipación específica

El punto inicial de la presente formulación es que el modelo k – desarrollado por Wilcox resuelve dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética de la turbulencia, k y otra para la frecuencia de la turbulencia.

**Ecuación**

$$\dots \dots \dots (50)$$

**Ecuación**

$$\dots \dots \dots (51)$$

Las variables independientes, la densidad,  $\rho$ , y el vector de velocidad, U, son tratadas como variables conocidas provenientes del método de Navier-Stokes.  $P_k$  es la tasa de producción de turbulencia, la cuales se calculan en el modelo k – .

**2.2.12 Modelo shear stress transport (SST)**

El modelo k- basado en el transporte de esfuerzos cortantes, brinda una alta precisión en la predicción de la aparición y cantidad de la separación de flujos bajo condiciones de gradientes de presión adversas; esta alta precisión se obtiene limitando la formulación de “Eddy Viscosity” restringiendo el limitador de la capa límite de la pared. Su formulación se basa en la distancia más cercana a la superficie y en las variables de flujo.

**2.2.13 Modelos de la capa límite**

La capa límite es la zona del campo fluido próxima a un contorno sólido en la que se manifiestan especialmente los efectos viscosos. Debido a la viscosidad y a la condición de no deslizamiento, cerca de cualquier contorno sólido aparece un gradiente de velocidades en la dirección normal a dicho contorno. Este gradiente de velocidades condiciona el intercambio energético

entre las distintas partículas de fluido con velocidades diferentes, originando vorticidad y turbulencia.

El problema básico para la modelización numérica del intercambio energético en la capa límite sobre cualquier frontera sólida consiste en la definición correcta de las velocidades de las partículas en una zona muy próxima a dicha frontera. Esto implica una densidad de mallado muy elevada, necesaria para capturar los distintos fenómenos que se producen dentro de la capa límite.

Esta dificultad se ha abordado usando varias aproximaciones, que se pueden englobar en cuatro grupos: modelos de distribución de las pérdidas, modelos de capa de cortadura, modelos de capa límite y leyes de pared, que son brevemente explicados a continuación.

#### **2.2.14 Niveles de aproximación numérica**

El desarrollo de las técnicas numéricas y su aplicación a cualquier ciencia o tecnología han dado lugar al desarrollo y a la concienciación generalizada de uno de los conceptos básicos en ingeniería como es el de grado de aproximación. Esta idea es bastante clara si se considera que lo que se pretende con cualquier técnica numérica es conocer las variables físicas a partir de la resolución numérica de una serie de ecuaciones que gobiernan el fenómeno.

Se han de definir y establecer las distintas aproximaciones que introducen los métodos numéricos. En lo referente a la Mecánica de Fluidos, la primera aproximación que aparece es el planteamiento del modelo físico-matemático que defina el comportamiento real de un determinado flujo. Dicho modelo matemático está habitualmente basado en la hipótesis del continuo, válida para la mayor parte de problemas industriales, pero que tiene sus limitaciones para casos extremos de flujos de gases. Una vez hecha esta salvedad, aplicando las leyes básicas de la física clásica se puede establecer una serie de ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento matemático de toda partícula fluida. La resolución exacta de dichas ecuaciones serviría para determinar completamente cualquier movimiento en el seno de un fluido. Se puede decir

que un modelo matemático se define únicamente tras haber considerado el nivel de aproximación a la realidad requerido a la hora de obtener la exactitud deseada en el cálculo de una serie de variables dependientes. Desafortunadamente, debido a la complejidad de las ecuaciones diferenciales que aparecen, a la complejidad geométrica de los flujos, y a la complejidad de las condiciones de contorno iniciales, no resulta posible obtener soluciones analíticas de dichas ecuaciones de gobierno.

Establecidas las ecuaciones de gobierno resulta imprescindible introducir una segunda aproximación al problema. La forma clásica de abordarlo sería construir un modelo a escala reducida del flujo en cuestión y analizarlo experimentalmente en el laboratorio. La aproximación numérica implica introducir algunas hipótesis simplificadas que aproximen lo más posible los resultados finales a los que se obtendrían si se pudiera calcular la solución exacta. Dichas hipótesis se dirigen habitualmente hacia la simplificación tanto de la geometría a estudiar como de las ecuaciones a resolver. Obviamente, al no disponerse de la solución analítica exacta resulta bastante complicado establecer de antemano qué hipótesis sirven y cuales son descartables y, por tanto, en cualquier simulación aplicada a la Mecánica de Fluidos, es preciso dedicar mucho esfuerzo al análisis de los resultados obtenidos antes de aceptarlos como válidos.

Una vez definidas las ecuaciones diferenciales simplificadas, aparece otro problema relacionado con el posible tratamiento que se pueda hacer de dichas ecuaciones usando técnicas computacionales. Por medio de los ordenadores resulta muy fácil resolver una ecuación o sistema de ecuaciones algebraico, sin embargo, las ecuaciones que estudian el movimiento de los fluidos son ecuaciones diferenciales no lineales. Resulta obligatorio realizar la transformación de las ecuaciones de forma que puedan ser resueltas por un ordenador. El paso de las ecuaciones diferenciales a sus equivalentes lineales

constituye otro nivel de aproximación y normalmente recibe el nombre de discretización de las ecuaciones.

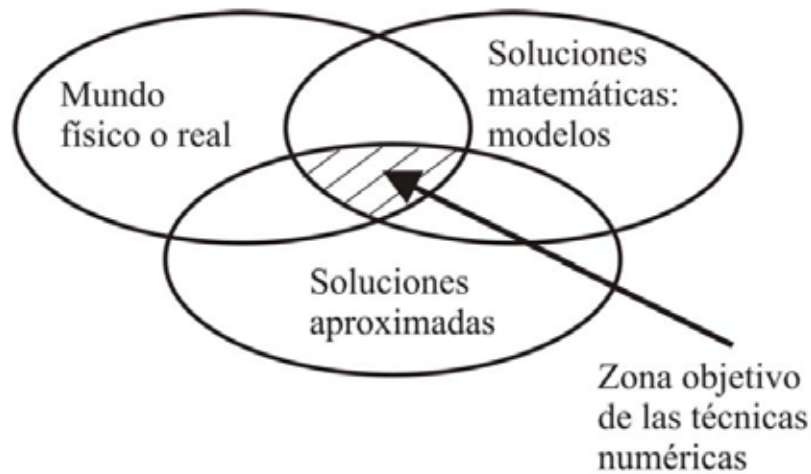
En cuanto a la geometría a estudiar, se debe señalar que la aproximación a la que debe someterse no sólo es de orden descriptivo respecto a su contorno, sino que además ha de establecerse la definición del espacio ocupado por el fluido. En este sentido, resulta imprescindible referir los puntos a un determinado sistema de coordenadas en los que se pretenderá resolver las ecuaciones para obtener soluciones de las variables deseadas. Aunque el campo fluido sea un continuo, no se puede pretender resolver las ecuaciones en todos los puntos de un determinado volumen, porque entonces se tendría un número enorme de ecuaciones a resolver. Por tanto, hay que elegir cierto conjunto de puntos en los que se resolverán las mencionadas ecuaciones y que serán los puntos dónde finalmente se conocerán los valores de las variables fluidas. La definición de estos puntos es lo que se denomina habitualmente discretización espacial del dominio (también se habla de generación del mallado). El proceso descrito no deja de ser otra aproximación que se introduce en el cálculo y que define el nivel de aproximación espacial.

En el caso de tener ecuaciones que dependan de la variable tiempo (flujo no estacionario) es esencial la definición de un nivel de aproximación temporal. No es posible tampoco estudiar la evolución de las variables en el tiempo de forma continua. El nivel indicará la forma de modelizar la evolución real introduciendo lo que se denomina discretización temporal del sistema de ecuaciones. A partir de la solución calculada se podrá realizar un promediado temporal oportuno para estudiar ciertas características medias de flujo que dependan de la evolución de las variables con el tiempo.

Finalmente, se pueden manipular las ecuaciones eliminando ciertos términos cuya influencia en un determinado problema se considere despreciable. La conclusión de que algún término no afecta a la solución de un determinado flujo se debe alcanzar tras analizar detenidamente la sensibilidad del problema

ante valores dispares de dicho término. Normalmente dicho estudio se hace tras dimensionalizar convenientemente las ecuaciones y realizar el correspondiente análisis de semejanza (técnicas asintóticas). Esta cuestión es de importancia capital en la Mecánica de Fluidos y está en el origen de cualquier estudio experimental. Desde el punto de vista numérico, la eliminación de algún término en las ecuaciones introduce lo que se denomina nivel de aproximación dinámico de las ecuaciones consideradas.

Resumiendo, desde el modelo matemático (ecuaciones diferenciales no lineales) que aproxima la realidad física en un medio continuo se llega a un número finito de ecuaciones algebraicas que eliminan algún término de las ecuaciones de partida y que aproximan la evolución temporal real que, tras resolver con técnicas apropiadas, proporcionan una aproximación al valor de las variables incógnita en los puntos elegidos como discretización espacial del dominio de cálculo. En definitiva, se establece un nivel de aproximación numérico límite por debajo del cual será imposible acercarse al valor real de las variables en los puntos elegidos. Sin embargo, desde un punto de vista ingenieril, el proceso descrito es perfectamente válido y ha significado a lo largo de la evolución de las técnicas numéricas, la posibilidad de mejorar diseños y ahorrar mucho esfuerzo que de otra manera supondría trabas insalvables a la evolución de muchos sectores industriales. En la Figura 7 se muestra gráficamente la panorámica explicada en este apartado.



**Figura 7.** Técnicas de aproximación numérica en mecánica de fluidos  
 Fuente: ANSYS® CFX-SolverTheory Guide

### 2.2.15 Método de solución numérica

Existen dos métodos fundamentales para el diseño y el análisis de sistemas en ingeniería relacionados con el flujo de fluidos: uno es la experimentación y otro es el cálculo. La experimentación, es basada mediante la construcción de modelos que son ensayados en instalaciones, mientras el segundo, el cálculo significa la resolución de ecuaciones diferenciales, estas ecuaciones se resuelven por métodos analíticos tradicionales o por métodos alternativos como se aplica a este trabajo, la cual es el método de volumen finito, en ambos métodos se puede hacer el uso de las herramientas computacionales para rapidez de cálculos.

Ambos métodos se complementan entre sí, por ejemplo, los ingenieros podrían obtener propiedades globales, como sustentación, fuerza de arrastre, caída de presión o potencia, experimentalmente; pero emplean la CFD para obtener detalles acerca del campo de flujo, como los esfuerzos de corte, velocidad y perfiles de presión y líneas de corriente. Además, los datos experimentales se emplean con frecuencia para validar soluciones de CFD al comparar cantidades globales determinadas de manera computacional y experimental. La CFD se emplea para reducir la cantidad necesaria de análisis

experimental. Actualmente la dinámica de fluidos computacional puede manejar flujos laminares, pero los flujos turbulentos de interés práctico son difíciles de resolver sin tener que recurrir a los modelos de turbulencia. Por desgracia, ningún modelo de turbulencia es universal y una buena solución en CFD de flujo turbulento depende de que tan apropiado sea el modelo de turbulencia aplicado. A pesar de esta limitación, los modelos estándares producen resultados razonables para muchos problemas prácticos de ingeniería. Continuando con lo antes dicho, se tiene que el punto de partida de cualquier método numérico es el modelo matemático, la selección las ecuaciones diferenciales o integrales y las condiciones de borde. Se elige un modelo apropiado para la aplicación (flujos compresibles o incompresibles, turbulentos, de dos o tres dimensiones, etc.). Como ya dijimos, este modelo podría incluir simplificaciones de las leyes de conservación. Un método de solución es designando un modelo para una ecuación en particular seleccionada.

#### **2.2.16 Método de discretización**

Después de seleccionar el modelo matemático, se tiene que elegir un método de discretización apropiado, un método de aproximación de las ecuaciones diferenciales por un sistema de ecuaciones algebraicas para las variables en estudio de localizaciones discontinuas en espacio y tiempo. Hay muchos enfoques, pero los más importante son: diferencia finita (FD), volumen finito (FV) y los métodos de elemento finito (FE). Cada método produce la misma solución si el mallado es muy refinado. Sin embargo, algunos métodos son más apropiados para alguna clase de problemas que otros. A menudo la preferencia es determinada por la actitud del desarrollador.

#### **2.2.17 Mallado o discretización numérica**

La generación de la malla donde se definen las celdas que es el punto de partida para el cálculo de las variables de flujo (velocidad y presión, etc.), en todo el dominio computacional. Los modernos paquetes comerciales de CFD

vienen con sus propios generadores de malla y también están disponibles programas para generar mallas independientes.

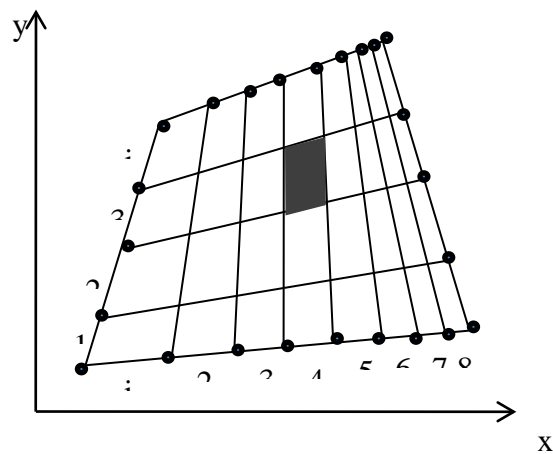
Las ubicaciones discontinuas en las que las variables calculadas son definidas por la discretización numérica que es esencialmente una representación discontinua del dominio geométrico sobre el cual el problema será solucionado. Divide el dominio de solución en un número finito de subdominios (elementos, volúmenes de control, etc.). Algunas de las opciones disponibles son las siguientes:

#### **2.2.17.1 Mallas estructuradas**

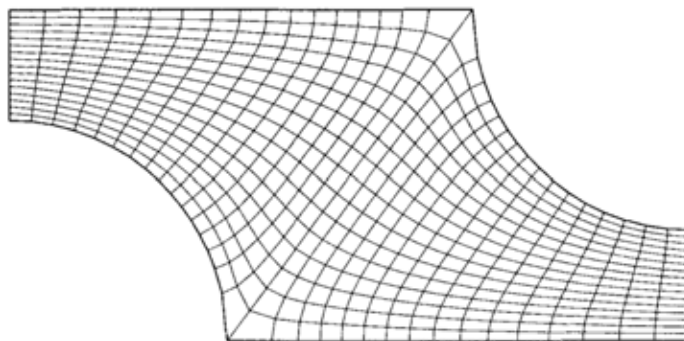
Consta por celdas planas con cuatro lados (2D) o celdas volumétricas con seis caras (3D). Aunque la forma rectangular de las celdas podría estar distorsionada, cada celda se enumera de acuerdo con los índices (i, j, k) que no necesariamente corresponden a las coordenadas “x”, “y” y “z”.

A continuación, en la figura 8 se muestra un ejemplo de malla estructurada bidimensional con nueve nodos y ocho intervalos en el lado superior e inferior, y cinco nodos y cuatro intervalos en los lados derecho e izquierdo. Se muestran los índices i y j. La celda sombreada esta en (i=4, j=3)

El mallado estructurado o regular está constituido por familias de cuadrículas lineales con la propiedad de que miembros de una familia no cruzan con otras y cada miembro cruza con otra familia sólo una vez. Esto permite que las líneas de una selección en particular sean enumeradas consecutivamente. La posición de cualquier punto de la cuadrícula (o el volumen de control) dentro del dominio es excepcionalmente identificado para la selección de dos o tres dimensiones. Esta es la estructura de cuadrícula más simple, ya que es de manera lógica equivalente a una cuadrícula cartesiana. Cada punto tiene cuatro vecinos cercanos en dos dimensiones y seis en tres dimensiones; uno de los índices de cada vecino del punto p (i, j, k) es diferente por  $\pm 1$  del índice correspondiente de p. Un ejemplo de una cuadrícula de 2D estructurada es indicado la figura 9.



**Figura 8.** Malla estructurada  
Fuente: ANSYS® CFX-SolverTheory Guide

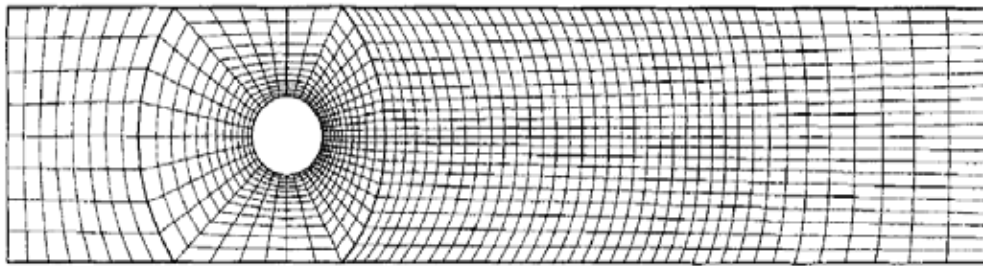


**Figura 9.** Cuadrícula estructurada en 2D  
Fuente: A. Pérez y C. Garre

Efectivamente, hay muchos solvers eficientes aplicables solamente a cuadrículas estructuradas. La desventaja de cuadrículas estructuradas es que pueden ser usadas solamente para dominios de solución geométrica simple. Otra desventaja es que podría ser difícil controlar la distribución de los puntos de la cuadrícula: la concentración de puntos en una región para razones de exactitud produce pequeños espacios innecesarios en otras partes del dominio solución y un desperdicio de recursos. Este problema es exagerado en los casos de 3D. Las celdas largas también podrían afectar la convergencia adversamente.

En las cuadrículas estructuradas en un bloque, hay dos (o más) niveles de subdivisión del dominio solución. Sobre el nivel rugoso, hay bloques en el que

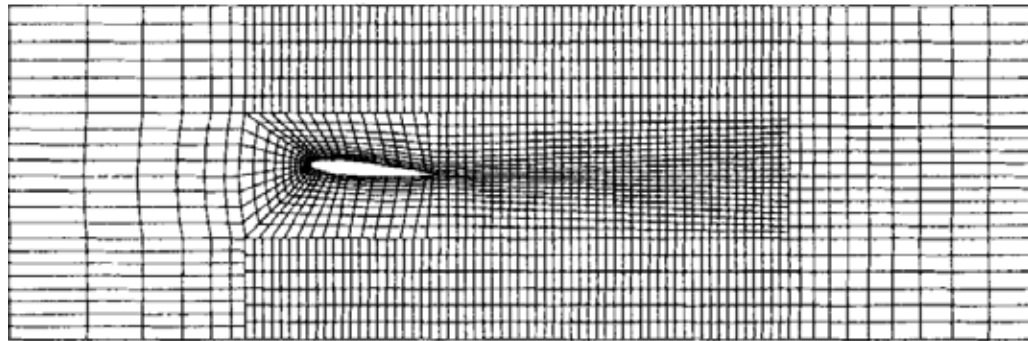
son relativamente grandes los segmentos del dominio; su estructura podría ser irregular y pueden o no ser superpuestos. Sobre el nivel (dentro de cada bloque) es definida una cuadrícula estructurada. El trato especial es necesario en las interfaces. En la figura 10 un mallado estructurado de bloque con combinación en las interfaces, es designado para el cálculo de la circulación del flujo en 2D alrededor de un canal cilíndrico y contiene tres bloques.



**Figura 10.** Mallado estructurado con interfaz ajustada

Fuente: A. Pérez y C. Garre

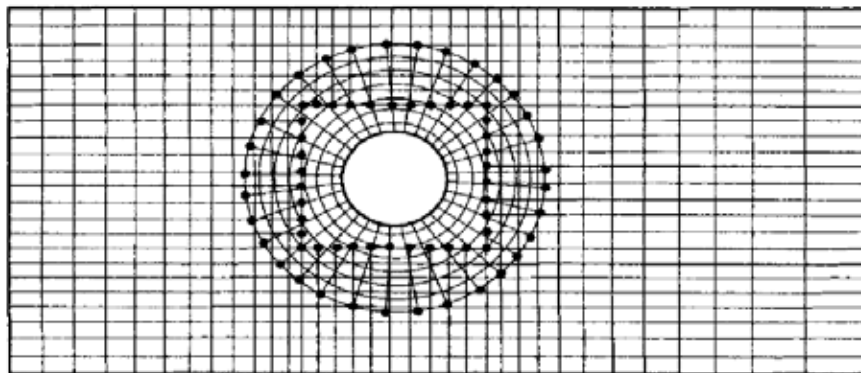
En la figura 11 se presenta un mallado estructurado en bloque sin ajuste en la interface; usado para calcular la circulación alrededor de un hidrodenslizador sumergido (hydrofoil). Consta de cinco bloques de cuadrículas de diferentes tamaños. Esta clase de cuadrícula es más flexible que los previos, cuando admite el uso de cuadrículas más finas en las regiones donde es requerida una gran resolución. El no ajuste en las interfaces puede ser tratado de una manera completamente conservadora. La programación es más difícil que para tipos de cuadrícula descritos antes. El Solver para mallas estructuradas puede ser aplicable como bloque, y los dominios de flujo complicados pueden ser tratados con estas cuadrículas. Es posible la refinación local del modo bloque (la cuadrícula puede ser refinada en algunos bloques).



**Figura 11.** Mallado estructurado en bloque 2D sin interfaces ajustadas

Fuente: A. Pérez y C. Garre

Las cuadrículas estructuradas con bloques con superposición se muestran en la figura 12. En la región de superposición, las condiciones de bordes para un bloque son obtenidas interpolando la solución del otro bloque (en superposición). La desventaja de estas cuadrículas es que las leyes de conservación no se hacen cumplir fácilmente en los límites del bloque. La ventaja de este enfoque es que los dominios complicados son arreglados con más facilidad y puede ser usado en los siguientes cuerpos móviles: un bloque es fijado al cuerpo y se mueve con él, mientras que una cuadrícula inactiva cubre los entornos.



**Figura 12.** Mallado compuesto en 2D

Fuente: A. Pérez y C. Garre

### 2.2.17.2 Cuadrículas (mallado) poco estructuradas

Consta de celdas de varias formas, comúnmente se emplean triángulos o cuadriláteros (2D) o tetraedros o hexaedros (3D). Se generan dos mallas no estructuradas para el mismo dominio que el de la figura 13, con la misma distribución de intervalo en los lados. A diferencia de la malla estructurada, en la no estructurada, no puede identificarse a las celdas de manera única mediante los índices  $i$  y  $j$ , en cambio, las celdas se numeran internamente de alguna otra manera por el paquete de la CFD.

Para configuraciones geométricas complejas, por lo general, es más fácil para el usuario del paquete de generación de malla crear una no estructurada. Por ejemplo, algunos paquetes de CFD (usualmente antiguos) están escritos de manera específicas para mallas estructuradas, estos convergen con mayor rapidez y con mayor exactitud, por utilizar la identificación celdas por índices como se hace en caso de mallas estructuradas; los modernos paquetes de CFD de aplicación general ya no presentan este problema ya que pueden manejar mallas estructuradas y no estructuradas. Por lo que se generan menos celdas con una malla estructuradas que con una no estructurada.

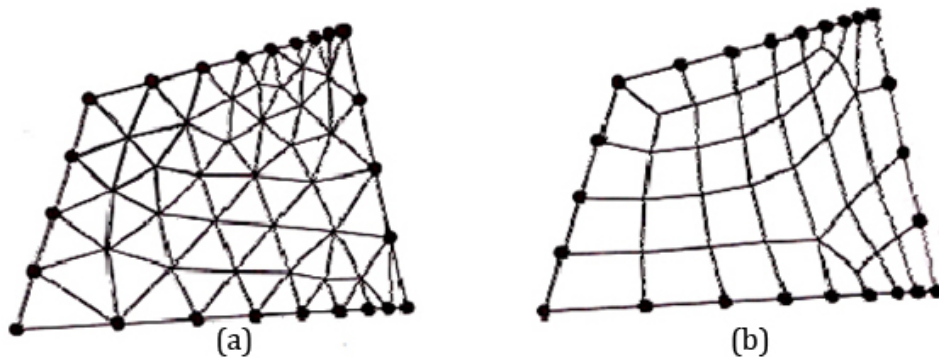
En la figura 8 la malla estructurada de  $8 \times 4 = 32$  celdas, mientras que la malla triangular no estructurada de la figura 1(a) tiene 76 celdas, y la malla cuadrilátera no estructurada de la figura 13(b) tiene 38 celdas, aun cuando se aplica la distribución de nodos en los lados de los tres casos.

A continuación, se presenta un ejemplo de malla no estructurada bidimensional con 9 nodos y 8 intervalos en los lados superior e inferior, y 5 nodos y 4 intervalos en los lados izquierdo y derecho. También la misma distribución de nodos que en la figura 13 (a) malla triangular no estructurada y (b) malla cuadrilátera no estructurada. La celda sombreada en (a) es levemente sesgada.

Útil para configuraciones muy complicadas, es el tipo de cuadrícula más flexible que puede ajustarse al límite de un dominio de solución arbitraria. En

principio, tales cuadrículas podían ser usadas con cualquier plan de discretización, pero se adaptan mejor al volumen finito y aproximaciones a elemento finito. Los elementos o los volúmenes de control podrían tener cualquier forma; no hay una restricción sobre el número de elementos vecinos o nodos. En la práctica, las cuadrículas hechas de triángulos o cuadriláteros en 2D, y tetraedros o hexaedros en 3D son usados a menudo. Tales cuadrículas pueden ser generadas automáticamente por los algoritmos existentes. Si se desea, la cuadrícula puede ser hecha de forma ortogonal, el radio de aspecto es fácilmente controlado, y la cuadrícula puede ser refinada fácilmente a nivel local. La ventaja de la flexibilidad es compensada por la desventaja de la irregularidad de la estructura de los datos. Las ubicaciones de los nodos y las conexiones vecinas necesitan ser especificadas explícitamente. Los “Solvers” para los sistemas de ecuaciones algebraicas son generalmente más lentos que para cuadrículas regulares.

Malla triangular no estructurada.      Malla cuadrilátera no estructurada.

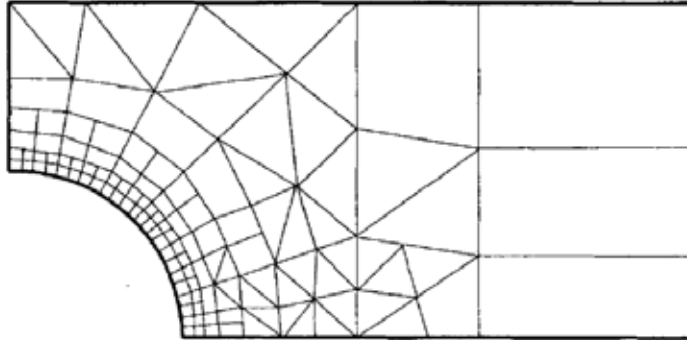


**Figura 13.** Malla no estructurada

Fuente: A. Pérez y C. Garre

Las mallas poco estructuradas son usadas con métodos de elemento finitos, y cada vez más, con los métodos de volumen finitos. Los códigos de computación para cuadrículas poco estructuradas son más flexibles. No necesitan ser cambiados cuando la cuadrícula es refinada a nivel local, o cuando

son usados los elementos o volúmenes de control de formas diferentes. Sin embargo, la generación del mallado y el pre-procesamiento son generalmente más difíciles. Un ejemplo de una cuadrícula poco estructurada, se muestra en la figura 14.



**Figura 14.** Ejemplo de mallado no estructurado en 2D

Fuente: A. Pérez y C. Garre

En las capas límite, donde las variables de flujo cambian con rapidez en la dirección normal de la pared y requieren de mallas de alta resolución en la cercanía de ésta, las mallas estructuradas permiten una resolución mucho más fina que las no estructuradas para el mismo número de celdas. Las celdas de mallas estructuradas son más delgadas y están muy compactadas cerca del lado derecho a diferencia que las celdas de mallas no estructuradas.

### **2.2.18 Concepto y características de la cavitación**

La cavitación es un fenómeno que se presenta en muchas turbomáquinas, ya sean bombas o turbinas hidráulicas, específicamente para transporte de fluidos líquidos incompresibles, aunque no es exclusivo de las máquinas de fluidos, la cavitación afecta a los álabes tanto de bombas como de turbinas hidráulicas y, pese a que sus causas y efectos han sido ampliamente estudiado a lo largo de los años, todavía hoy dan lugar a serios problemas de funcionamiento.

#### **2.2.18.1 Descripción del fenómeno de la cavitación**

La cavitación puede definirse como la formación y posterior colapso (implosión) de burbujas de gas (cavidades) en el caso de un líquido (equilibrio evaporación –

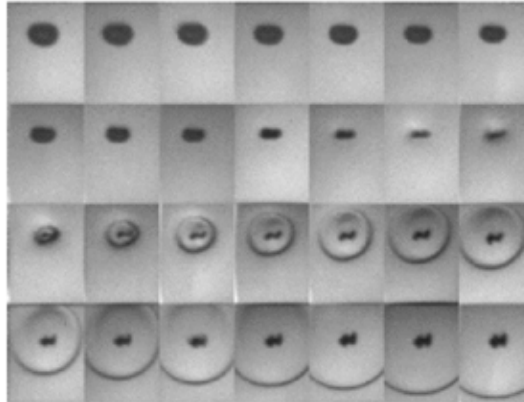
condensación). Esta variable dependerá básicamente del estado termodinámico considerado, así que para un líquido en reposo se puede lograr por el incremento de la temperatura por transferencia de calor y para líquidos en movimiento se puede lograr por medio de una disminución local de la presión por el aumento de la velocidad, y las burbujas generadas son transportadas aguas abajo por la corriente hasta zonas donde la presión es más alta, dando lugar al brusco colapso de las mismas.

El hecho de que generar una burbuja en el seno de un fluido requiere una gran cantidad de energía local (el gradiente de presión líquido-burbuja es proporcional al inverso del radio de la burbuja) sin embargo, se debe considerar que el medio fluido real presenta siempre puntos de nucleación, es decir, partículas en suspensión, suciedades u otros. Estos dan lugar a discontinuidades del medio y a superficies cóncavas que inducen la nucleación o germinación de las burbujas. A continuación, el crecimiento es inmediato hasta alcanzarse el equilibrio de presiones. Tal y como se ha señalado en el apartado anterior, una vez que se ha generado la burbuja, todo proceso de cavitación presenta dos fases claramente diferenciadas: el crecimiento de las burbujas y el colapso.

El crecimiento aparece asociado a los puntos de germinación (discontinuidades). Puede ser lenta o rápida, según el mecanismo predominante que genere la cavitación. Si el líquido tiene un alto contenido en gas, el crecimiento es lento y se produce por difusión de vapor (cavitación gaseosa), mientras que si la cavitación se debe a la reducción brusca de la presión se denomina cavitación vaporosa y resulta ser un proceso muy rápido. Por tanto, el crecimiento es función de la formación inicial de las burbujas y de la presión exterior.

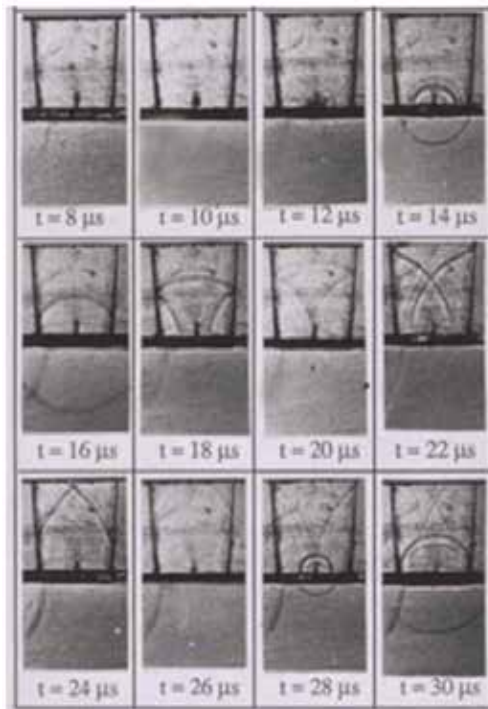
Una vez formada la burbuja, puede ocurrir que cambien las condiciones del medio que la rodea y que dicha burbuja colapse. El colapso de una burbuja induce una onda de presión en el medio que la rodea. Localmente, los niveles de presión no son muy elevados pero sus efectos pueden ser catastróficos por actuar normalmente sobre

superficies muy reducidas. El colapso es un fenómeno catastrófico en el que la burbuja disminuye drásticamente su tamaño. Afecta, por tanto, de un modo no estacionario sobre la resistencia de los materiales donde colapse (ver figuras 15 y 16).



**Figura 15.** Colapso de una burbuja en un flujo libre

Fuente:



**Figura 16.** Colapso de una burbuja en la zona de una superficie sólida

Fuente:

### 2.2.18.2 Tipos de cavitación

Se puede clasificar la cavitación según la forma en la que se produce, según el grado de desarrollo de la misma y según la forma de manifestarse macroscópicamente.

a)

:

**Cavitación de vapor:** debida a la disminución local de la presión en el seno de un líquido. Puede ser hidrodinámica, creada por depresiones locales debidas a la aceleración del fluido, o acústica, debida a ondas de presión transmitidas en el fluido.

**Cavitación gaseosa:** ocasionada por la introducción desde el exterior de energía en puntos del líquido (aumento de la temperatura, inducir vibración local de las partículas, etc.). Se habla entonces de cavitación óptica o cavitación de partículas.

**Cavitación incipiente:** es una etapa inicial de la cavitación en la que empieza a ser visible la formación de las burbujas.

**Cavitación desarrollada:** se trata de una etapa en la que se tiene un número de burbujas lo suficientemente elevado como para producir una modificación del campo hidrodinámico.

**Supercavitación:** cuando se tiene una superficie sólida sumergida, la cavitación se extiende ocupando en su totalidad dicha superficie. Aparece, por ejemplo, en las hélices de lanchas rápidas en las que las condiciones ante la cavitación son críticas.

**Cavitación separada:** etapa final de la cavitación, cuando está próxima a desaparecer. Se produce normalmente en las zonas de estela y su importancia es mucho menor que las anteriores.

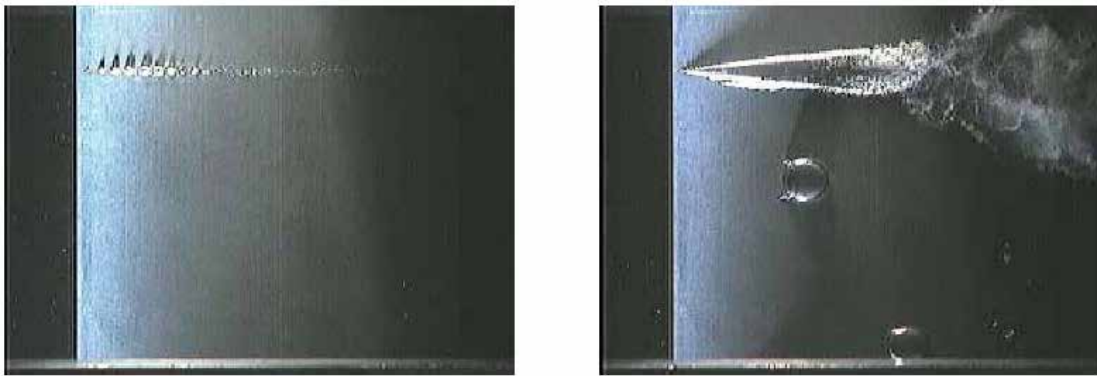
(ver figuras 17 y 18):

**Cavitación de burbujas aisladas** (bubble cavitation). Cuando el número de burbujas es muy denso da lugar a la llamada cavitación de nube (cloud cavitation).

**Cavitación de lámina** (sheet cavitation).

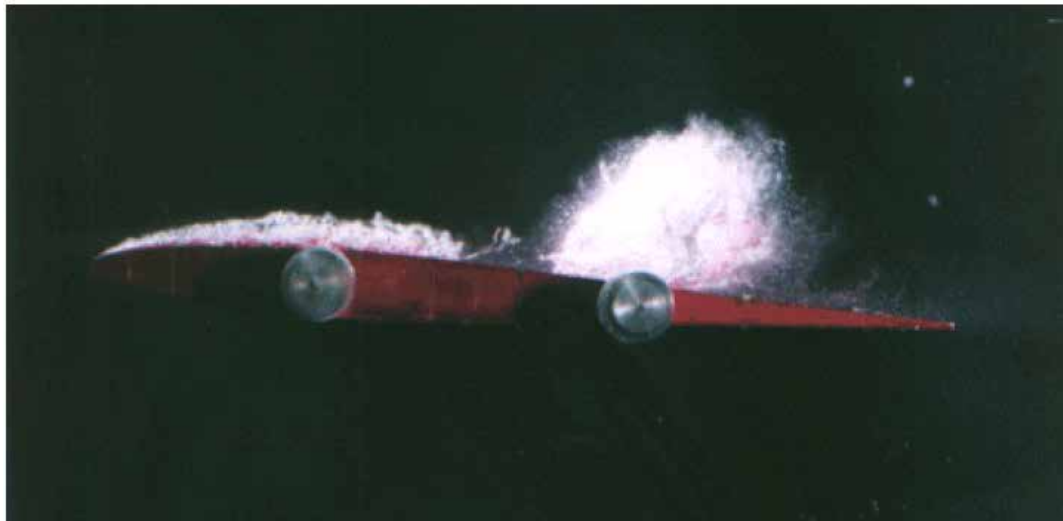
**Cavitación de vórtice** (vortex cavitation).

**Cavitación de estría** (streak cavitation), es un tipo de cavitación de burbujas, en la que la nucleación de las mismas se produce siguiendo una línea.



**Figura 17.** Cavitación de a) burbuja (bubble) y de b) estrias (streak)

Fuente:

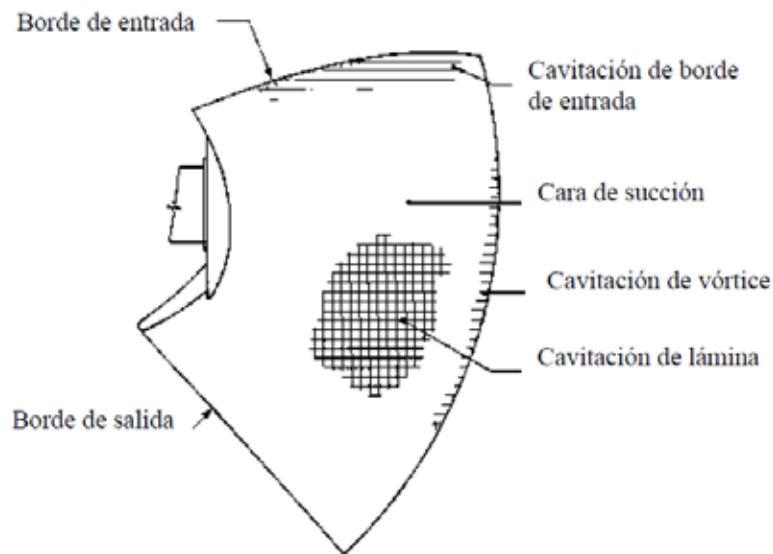


**Figura 18.** Cavitación de lámina (sheet) y de nube (cloud)

Fuente:

### 2.2.18.3 Cavitación en turbinas hidráulicas

En las bombas de presión dinámica se presentan varios tipos de cavitación (burbuja, lámina y vórtice, figura 19), y estos también pueden aparecer en las turbinas hidráulicas, sin embargo existe otro tipo denominado **cavitación de antorcha** en la sección central, que puede llegar hasta la descarga y aspirar aire, como se muestra en la figura 20, con consecuencias similares al caso de las bombas: disminución de las prestaciones; caída del momento torsor, potencia útil, vibraciones y ruido, erosión de los álabes. También hay que tener en cuenta la existencia de aire en el líquido bombeado y la temperatura de funcionamiento porque podría modificar el valor de la presión de vapor. En este caso es crítico el diseño del conducto de descarga, que se debe diseñar de forma que las pérdidas de energía sean mínimas.



**Figura 19.** Tipos de cavitación en turbinas hidráulicas

Fuente:

Por medio del análisis dimensional se puede definir el coeficiente de cavitación o parámetro de Thoma, de la forma:

$$\frac{\sigma}{\rho \omega^2 D^3} = \text{constante} \quad (52)$$

Donde la diferencia de cotas geodésicas  $Z_2 - Z_A = 0$ , es decir que la turbina esté por debajo del nivel del agua y a lo que se denomina

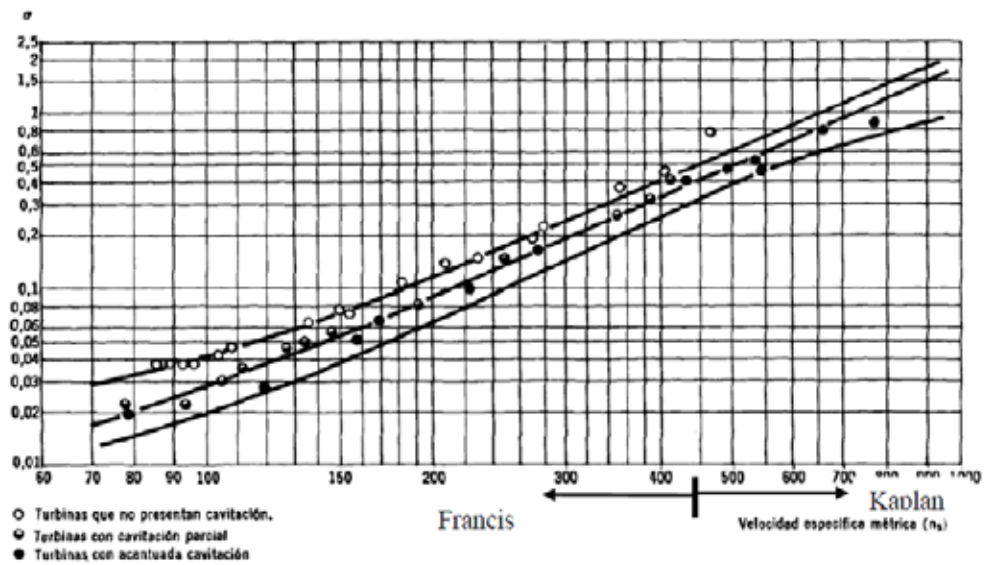


**Figura 20.** Cavitación tipo antorcha en turbinas hidráulicas

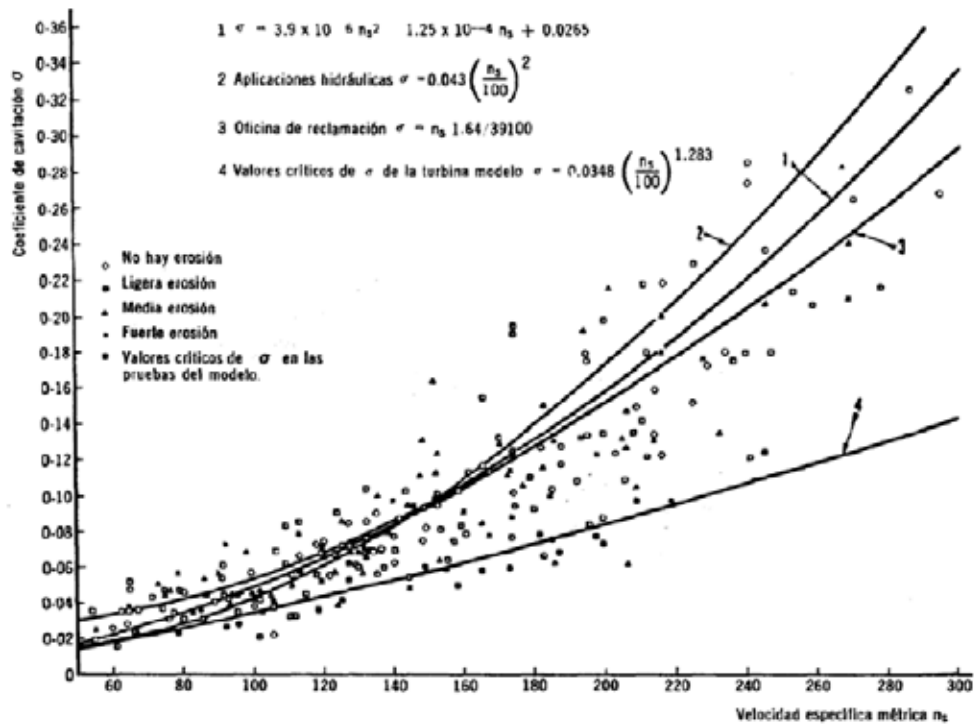
Fuente:

El parámetro de Thoma es función de la velocidad específica de rotación y en la figura 21 se muestra la evolución de dicho coeficiente para turbinas hidráulicas tipo Francis y tipo Kaplan.

Por su parte en la figura 22 se muestran cuatro correlaciones experimentales del parámetro de Thoma y sus valores críticos, también en la figura 18 se muestra un gráfico de los límites de cavitación en función de la velocidad específica de rotación.



**Figura 21.** Coeficiente de Thoma en función de  $n_s$  (Turbinas Francis y Kaplan)  
Fuente:



**Figura 22.** Correlaciones experimentales para la obtención del coeficiente de Thoma en función de  $n_s$   
Fuente:

### 2.3 Definición de términos básicos

**Álabes:** Es la paleta curva de una turbomáquina o máquina de fluido rotodinámica. Forma parte del rodete y, en su caso, también del difusor o del distribuidor. Los álabes desvían el flujo de corriente, bien para la transformación entre energía cinética y energía de presión.

**Caudal:** cantidad de fluido que pasa por segundo por un área determinada.

**Cantidad de movimiento:** es la cantidad de movimiento por unidad de volumen integrada sobre el volumen, donde la cantidad de movimiento por unidad de volumen es la densidad de la partícula material multiplicada por su velocidad.

**Chorro Libre:** es considerado como un flujo fluido que fluye desde un conducto hacia una zona relativamente grande que contiene fluido, el cual tiene una velocidad respecto al chorro que es paralela a la dirección del flujo en el chorro.

**Condición de estancamiento:** estado termodinámico en el cual la sustancia alcanza el reposo de forma adiabática y toda su energía se encuentra en forma de entalpía.

**Entalpía:** es la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno.

**Entropía:** puede definirse esquemáticamente como el "progreso para la destrucción" o "desorden inherente a un sistema".

**Ecuación de continuidad:** se usa para relacionar la densidad del fluido, el área del fluido y la velocidad de éste en dos secciones del sistema donde existe flujo estable. Es válido para todos los fluidos, ya sean gases o líquidos.

**Erosión:** Desgaste producido en la superficie de un cuerpo por el roce o frotamiento de otro.

**Estabilidad:** una medida de la capacidad de un sistema de resistir la perturbación. La capacidad de recuperar la posición original tras el cambio.

**Flujo:** el flujo de una cantidad por una superficie. Por ejemplo, el flujo de la energía siempre va desde algún lugar a otro lugar, es decir que la naturaleza del vector es importante.

**Fluido:** se define como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo de corte, por tanto, en ausencia de este, no habrá deformación. Los fluidos pueden clasificarse de manera general de acuerdo con la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la relación de deformación.

**Flujo incompresible:** es aquel en los cuales los cambios de densidad de un punto a otro son despreciables.

**Flujo ideal:** es aquel flujo incompresible y carente de fricción. La hipótesis de un flujo ideal es de gran utilidad al analizar problemas que tengan grandes gastos de fluido, como en el movimiento de un aeroplano o de un submarino. Un fluido que no presente fricción resulta no viscoso y los procesos en que se tenga en cuenta su escurrimiento son reversibles.

**Flujo permanente:** llamado también flujo estacionario. Este tipo de flujo se caracteriza porque las condiciones de velocidad de escurrimiento en cualquier punto no cambian con el tiempo, o sea que permanecen constantes con el tiempo o bien, si las variaciones en ellas son tan pequeñas con respecto a los valores medios.

**Flujo unidimensional:** es un flujo en el que el vector de velocidad sólo depende de una variable espacial, es decir que se desprecian los cambios de velocidad transversales a la dirección principal del escurrimiento. Dichos flujos se dan en tuberías largas y rectas o entre placas paralelas.

**Flujo uniforme:** este tipo de flujos son poco comunes y ocurren cuando el vector velocidad en todos los puntos del escurrimiento es idéntico tanto en magnitud como en dirección para un instante dado o expresado matemáticamente.

**Gradiente:** el índice de mayor cambio por unidad de longitud de una variable en el espacio a partir de un punto de interés.

**Rendimiento:** relación entre lo obtenido y lo invertido para obtenerlo.

**Turbomáquinas:** máquina generadora o receptora, que actúa dinámicamente sobre un fluido mediante una rueda provista de compartimientos, móvil alrededor de un eje fijo.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Tipo de investigación**

La investigación puede ser de varios tipos, y en tal sentido se puede clasificar de distintas maneras, sin embargo es común hacerlo en función de su nivel, de acuerdo a esto podemos clasificarlas en: Investigación exploratoria, la cual se efectúa sobre un tema u objeto desconocido o poco estudiado y su resultado constituye una visión aproximada de dicho objeto, Investigación descriptiva, la cual consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento, y la Investigación explicativa que se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa y efecto

#### **3.2 Diseño de investigación**

De acuerdo con Hernández. (1998), el diseño de investigación constituye el plan general del investigador para conseguir una respuesta clara a sus interrogantes o comprobar una hipótesis de investigación. El diseño de la investigación se encarga de detallar las estrategias básicas que el investigador adopta para conseguir información exacta y que se pueda interpretar. El tipo de investigación es la manera que se va a adoptar para cumplir con los objetivos, existen varios tipos de investigación los cuales pueden ser; Experimental, de Campo o Documental.

En base al objetivo general, se concibe que el nivel de la actual investigación será de tipo  ya que en este se busca obtener y analizar datos provenientes de materiales impresos u otro tipo de documentos para realizar la simulación del fenómeno de cavitación, en este caso con ayuda de una herramienta computacional de análisis de volúmenes finitos y la técnica de CFD. Por lo tanto, el estudio se encuentra alineado en este nivel documental.

Según Zorrilla. (1993), la investigación documental es aquella que se realiza a través de la consulta de documentos (libros, revistas, periódicos, memorias, anuarios, registros, códigos, constituciones, etc.).

### **3.3 Nivel de la investigación**

El nivel de conocimiento es descriptivo, y éste consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Hernández (2004), señala que la investigación descriptiva busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice. Teniendo como objetivo indagar la incidencia y los valores en que se manifiestan una o más variables al ubicar, categorizar y proporcionar la visión de una comunidad, un evento, un contexto, un fenómeno o situación.

En este orden de ideas, la investigación se basa en describir el comportamiento de las variables del fluido que componen el campo de flujo, incluyendo la aparición de flujo bifásico líquido – vapor para estudiar la cavitación, en una situación rigurosamente controlada y de esta manera fijar los parámetros por los cuales se regirá la investigación.

### **3.4 Población y muestra**

La población Hurtado y Toro (2001), la definen como: “es la composición de todos los elementos a ser estudiados y a quienes podrán ser generalizados los resultados de la investigación, una vez concluida ésta, para lo que es necesario que la muestra con la cual se trabaje sea representativa de la población”. Por ende, la población será las diferentes curvas características y gráficas experimentales que muestran los fabricantes. La muestra a emplear en este proyecto es una muestra del tipo no probabilística, donde Véliz, y Arredondo determinan en su trabajo de grado titulado Aspectos Teóricos sobre tipos de Muestreo, que este tipo de muestra es: “aquel tipo de muestra para el cual no puede no puede calcularse la probabilidad de extracción de una determinada muestra (p. 30)”.

Por lo tanto, las muestras seleccionadas son: los diferentes puntos o nodos que se generen por la discretización del dominio fluidizado y en los cuales se evaluarán las características del fluido.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (1998) se define a la técnica de recolección de datos como “las observaciones que consisten en el registro sistemático, cálido y confiable de comportamientos o conductas”. Las técnicas para la recolección de datos son básicamente: revisiones bibliográficas, entrevistas, registros de prensa, observaciones directas, entre otras. Existen diversos instrumentos para la recolección de estos datos los cuales son: computadores, lápiz, hojas, grabadoras, fotografías, entre otras.

Las técnicas a utilizar en el presente trabajo serán:

Localización y consolidación de los datos.

Revisión documental: Esta técnica se realizará con el fin de profundizar la información recopilada con todas las aplicadas anteriormente, esta comprende la búsqueda de la información de documentos empresariales, que contribuyan al conocimiento del comportamiento de sucesos realizados que sirvan de apoyo para el desarrollo de teorías pertinentes para la resolución de problemas. (Candelo, 2006).

Y por último, en el presente trabajo se contará con la utilidad de computadoras para conseguir los resultados obtenidos por la simulación que describen el comportamiento del campo de flujo, con los cuales se procede a comparar con valores experimentales realizados anteriormente y/o formular hipótesis en base a los principios de conservación para lograr la validación de los mismos.

### **3.6 Fases metodológicas**

Se describirán de manera individual, las respectivas acciones, procedimientos, técnicas y actividades a realizar, para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos planteados.

**Fase I: “Investigación sobre de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de una turbina hidráulica tipo Kaplan”**

A través de los diferentes antecedentes seleccionado y apoyados por material bibliográfico técnico sobre turbomáquinas y flujo incompresible, se identificarán las variables que permiten la explicación fenomenológica del paso del flujo de agua a través del dominio fluidizado del rotor de una turbina hidráulica tipo Kaplan, involucrando todas las condiciones de flujo que puedan presentarse, con la finalidad de caracterizar la cavitación clásica.

**Fase II: “Selección de una turbina real e identificación de sus características geométricas con la finalidad de modelarla mediante una herramienta (CAD)”**

Luego de una exhaustiva investigación y documentación en base a varios artículos científicos y estudios sobre el campo de flujo incompresible a través de una turbina hidráulica tipo Kaplan, se seleccionará una que será el modelo a estudiar. Se determinan los parámetros dimensionales y condiciones de flujo para la aplicación de la investigación y los estudios, a fin de manejarlos como data necesaria para realizar los objetivos del proyecto de investigación. Luego se modelará mediante una herramienta de dibujo asistido por computadora CAD por sus siglas en inglés.

**Fase III: “Simulación del campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD)”**

Una vez realizada la revisión bibliográfica satisfactoria, se determinan los modelos matemáticos más apropiados para la realización de la simulación numérica basándose en la interpretación de la investigación bibliográfica y de ser necesario la comparación de los resultados obtenidos en la simulación de modelos similares al seleccionado en esta investigación. La idea es establecer las condiciones para que aparezca el fenómeno de cavitación y chequear cual es el rango de cotas geodésicas que permiten la aparición de dichas inestabilidades hidrodinámicas.

**Fase IV: “Obtención de los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático”**

La simulación del campo de flujo se realiza a través de la configuración del software ANSYS® Workbench CFX®, es decir, una herramienta que aplica CFD (computational fluid dynamics) para ejecutar algoritmos computacionales seleccionados para la solución de los modelos matemáticos, estableciendo también los criterios de convergencia que tendrá a la hora de realizar los cálculos, donde se especifica el número máximo de iteraciones o pasos a realizar para el cálculo, así como el valor objetivo del criterio de convergencia ya sea residual o máximo. El cálculo se detendrá al cumplirse cualquiera de estas dos condiciones y así poder generar la data, gráficos y/o diagramas para la descripción de las variables involucradas.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos y su respectivo análisis del proceso de simulación del campo de flujo a través del lecho fluidizado del rotor de la turbina.

#### **4.1 Investigación de las variables que intervienen en el comportamiento del campo de flujo a través de una turbina hidráulica tipo Kaplan**

El campo de flujo a través de una turbina hidráulica tipo Kaplan, no se explica detalladamente en las investigaciones existentes, o como los diferentes fenómenos se presentan dentro de la misma, por otro lado, existe apoyo en el área de la dinámica de fluidos computacional y del uso de técnicas de aproximación numérica para lograr obtener resultados deseados, pero no existen tantos en donde se detallen los diferentes comportamientos que intervienen dentro de la misma, sin embargo, se hizo una investigación bibliográfica en artículos (papers) y tesis de grado, donde se logró obtener algunas variables que suministraron mucha información para guiar esta investigación, como sería el comportamiento del fluido de (agua líquida y vapor de agua) cuando entra por la cámara de alimentación, pasa por predistribuidor, después por el distribuidor, luego por el rotor y finalmente sale por el tubo de desfogue, de modo que permiten determinar, los esfuerzos hidrodinámicos, así como los esfuerzos que actúan sobre los álabes que pueden estar orientados en diversos ángulos, por los que infieren el aumento de caudal, el flujo másico, la fracción de vapor que se genera mediante esos cambios de presiones y de velocidad, cómo se transporta el fluido hacia el rotor de la turbina, ya que estas variables definen el comportamiento de la cavitación en los álabes.

#### **4.2 Selección de una turbina real e identificación de sus características geométricas con la finalidad de modelarla mediante una herramienta (CAD)**

Se seleccionó el rotor de la turbina hidráulica de reacción tipo Kaplan marca GILKES, SERIAL 5960, año de fabricación 1.960. La carcasa está montada en posición horizontal, diámetro del Impulsor de la turbina = 203.2 mm número de álabes del rodete = 4. El material tanto del cuerpo, los álabes y punta cónica son de bronce. El rotor tiene la modalidad de variar lo ángulos, para este estudio se orientará en 15°, 22.5°, 30°, 37.5° y 45°



**Figura 23.** Turbina Kaplan Gilkes

Fuente: García (2016)

##### **Dimensiones del rotor de la turbina**

Diámetro del rodete del impulsor: 90mm

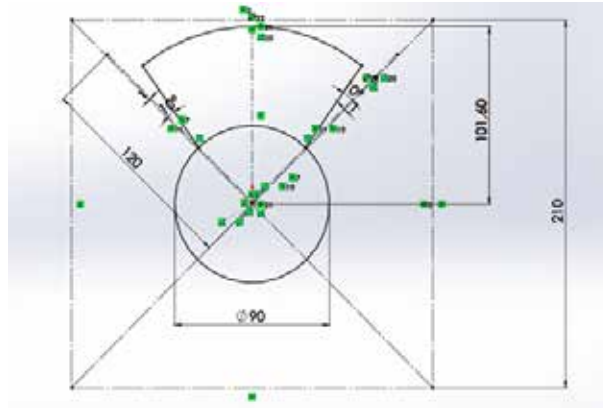
Diámetro del impulsor de la turbina: 203,2mm

Espesor de los álabes: 6mm

Ya obtenida las dimensiones del rotor de la turbina Kaplan, se realizaron los modelos de la geometría de los álabes en SOLIDWORKS , de esta manera se obtuvo en la simulación resultados que demuestran la cavitación.

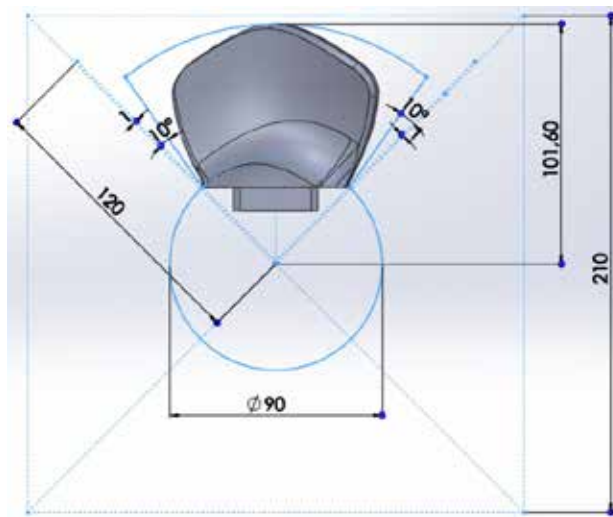
#### 4.2.1 Modelado geométrico de los álabes del rotor de la turbina a estudiar por medio de SOLIDWORKS

Se diseñó los álabes el rotor de la turbina Kaplan con las dimensiones descritas anteriormente por medio de SOLIDWORKS



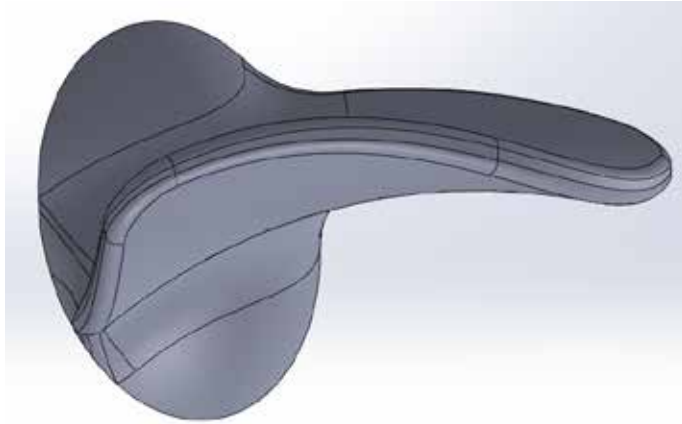
**Figura 24.** Vista de planta del diseño del croquis álabe

Fuente: Mier y Terán (2019)



**Figura 25.** Redondeo de puntas, extrusión y torsión del álabe

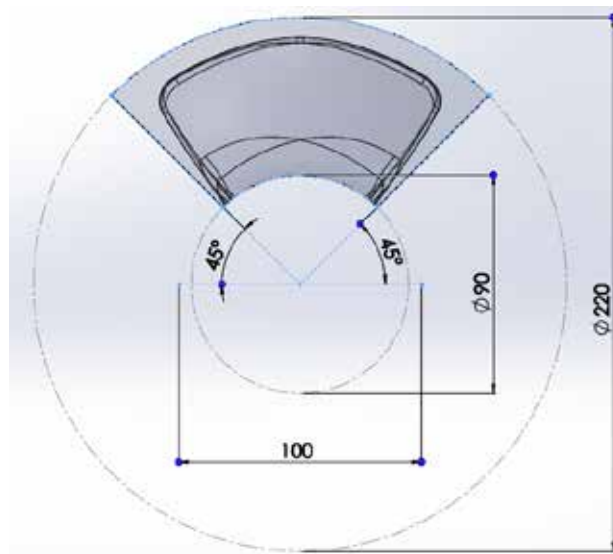
Fuente: Mier y Terán (2019)



**Figura 26.** Diseño final del álabe

Fuente: Mier y Terán (2019)

#### 4.2.2 Posteriormente se diseñó el dominio de los álaves

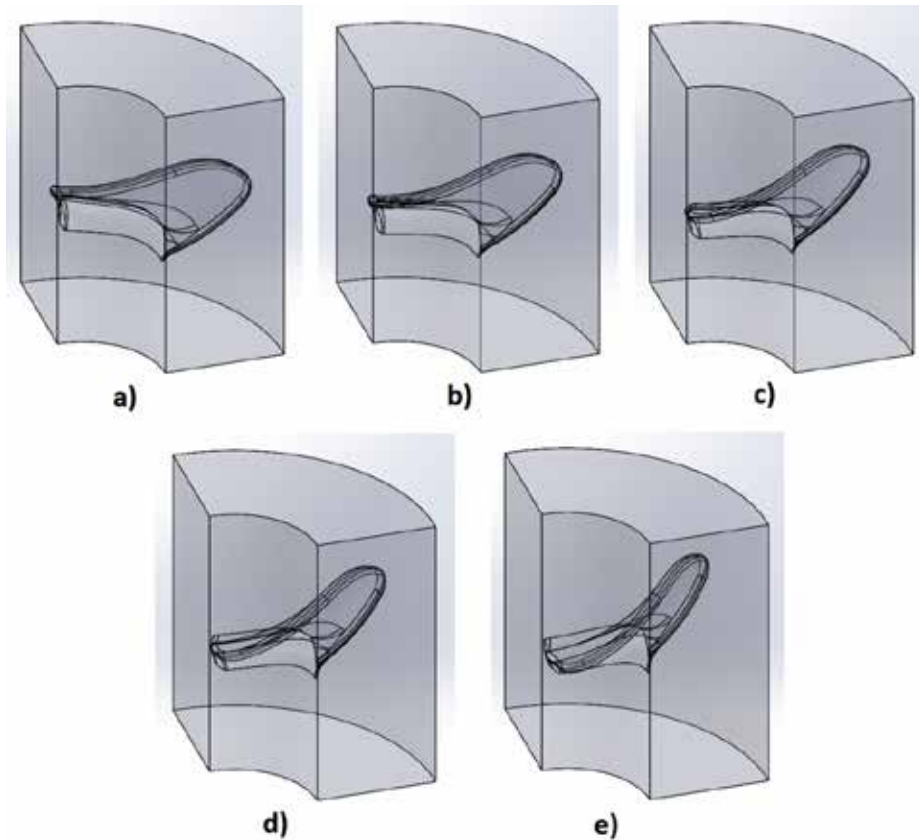


**Figura 27.** Diseño del dominio, vista de planta del croquis.

Fuente: Mier y Terán (2019)

Este dominio es el más óptimo para lograr las simulaciones, debido a que se ajusta en su totalidad a las dimensiones de los álaves del rotor, de modo que guarda en su interior la mayor área ocupada por cada álabe, con un diámetro interno de 90mm, el cual comprende el centro del rotor y con un diámetro externo 220mm que

llega hasta la carcasa, también posee forma cilíndrica para permitir el movimiento rotativo, así que solo será necesario 1/4 del cilindro.



**Figura 28.** Vista isométrica del dominio en álabes a) 15°, b) 22.5°, c) 30°, d) 37.5° y e) 45°

Fuente: Mier y Terán (2019)

### **4.3 Simulación del campo de flujo mediante una herramienta de dinámica de fluido computacional (CFD)**

Para estudiar el fenómeno de cavitación se orientará el ángulo de los álabes del rotor en 15°, 22.5°, 30°, 37.5° y 45°. Primero se trabajará con el de 15°.

### 4.3.1 Se importó el dominio a el Software ANSYS por medio de DesignModeler.

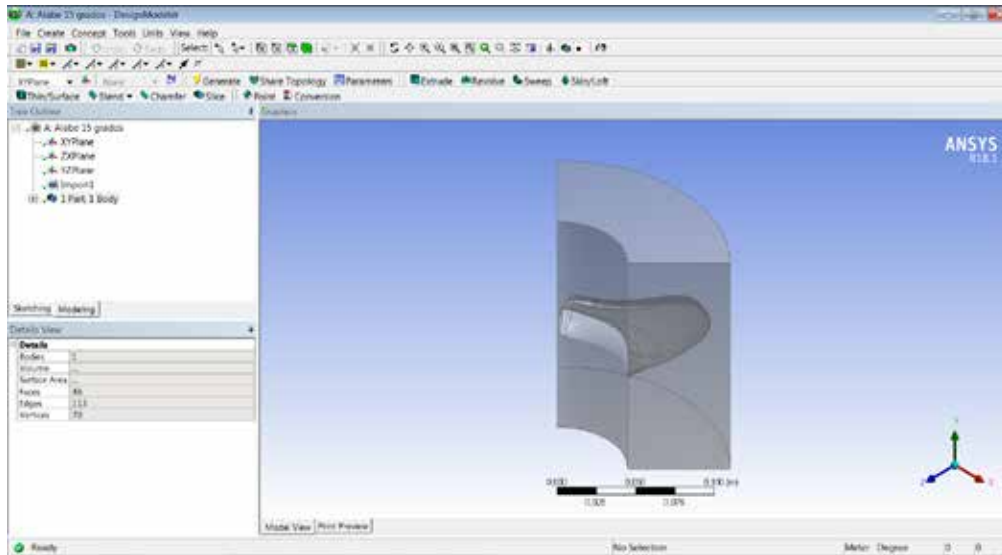


Figura 29. Importación del dominio en DM

Fuente: Mier y Terán (2019)

### 4.3.2 Mallado del dominio fluidizado

Se necesitó mallar el dominio de modo que refina los resultados de la simulación, por ello se introduce a Meshing para configurar el mallado

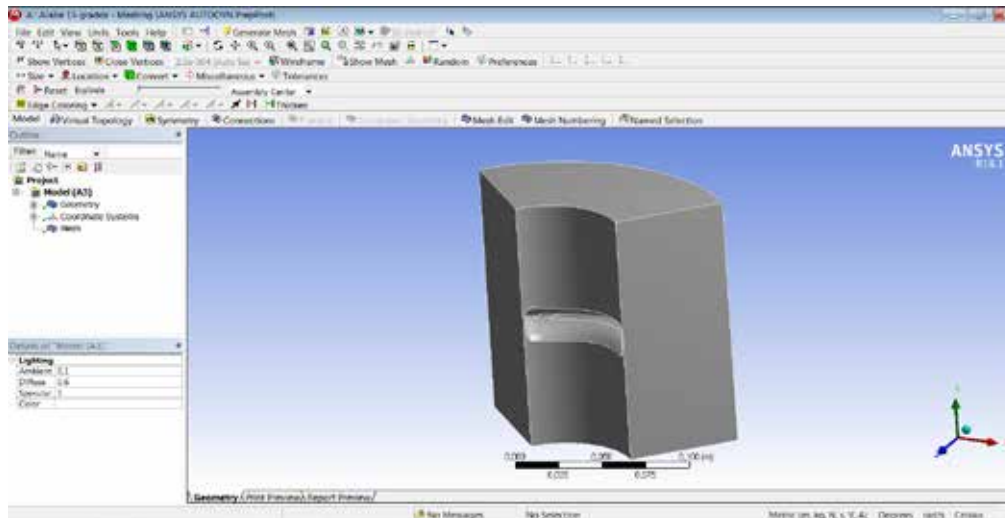
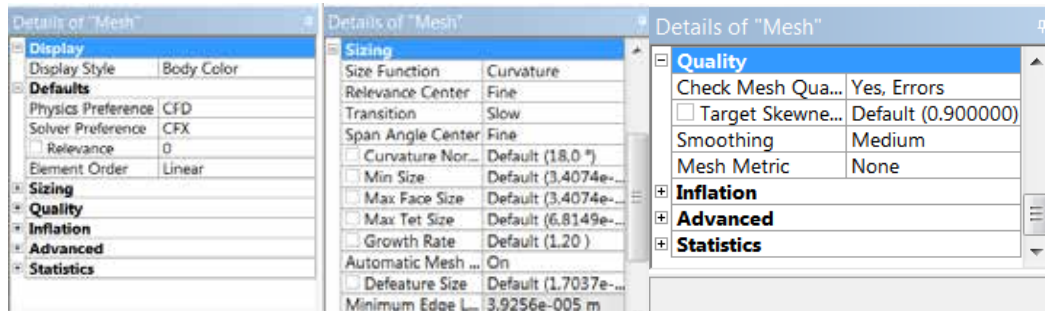


Figura 30. Vista del Dominio en Meshing

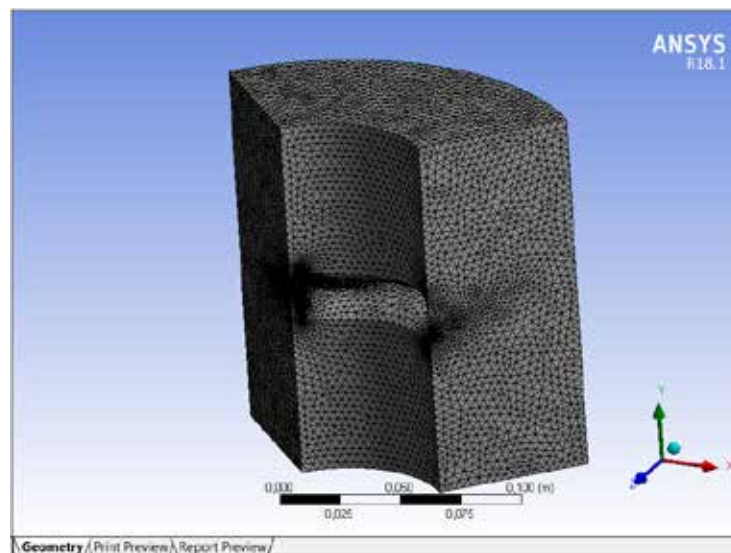
Fuente: Mier y Terán (2019)

Se procede a configurar el dominio para realizar el mallado



**Figura 31.** Parámetros de la configuración del mallado.

Fuente: Mier y Terán (2019)

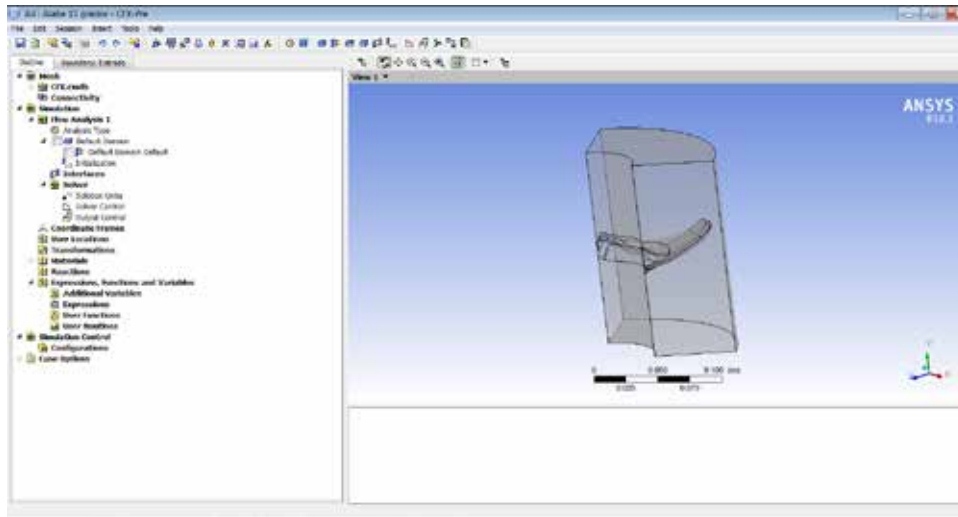


**Figura 32.** Resultado del mallado

Fuente: Mier y Terán (2019)

### 4.3.3 Configuración del dominio, condiciones de borde e interfaces

Primeramente, se importó el mallado previamente realizado, al software de análisis numérico incorporado a la herramienta CFD.

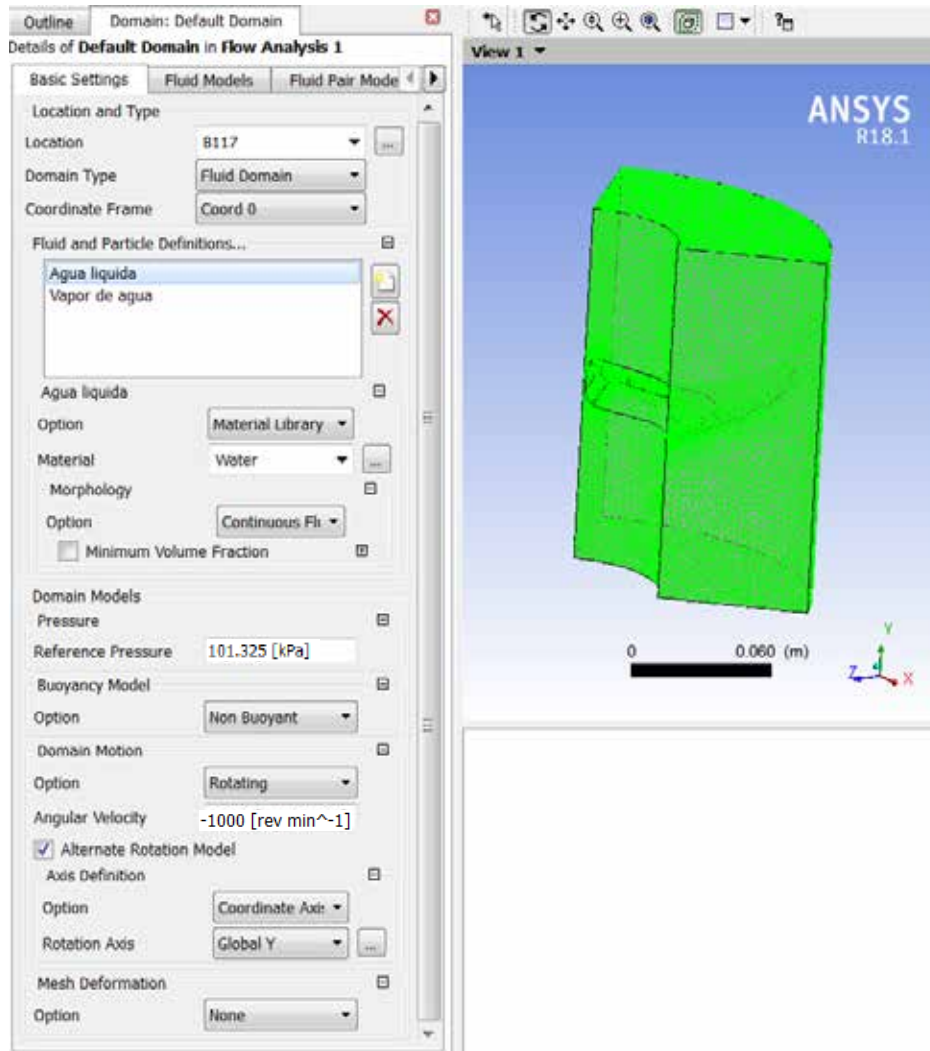


**Figura 33.** Vista del dominio para realizar su configuración

Fuente: Mier y Terán (2019)

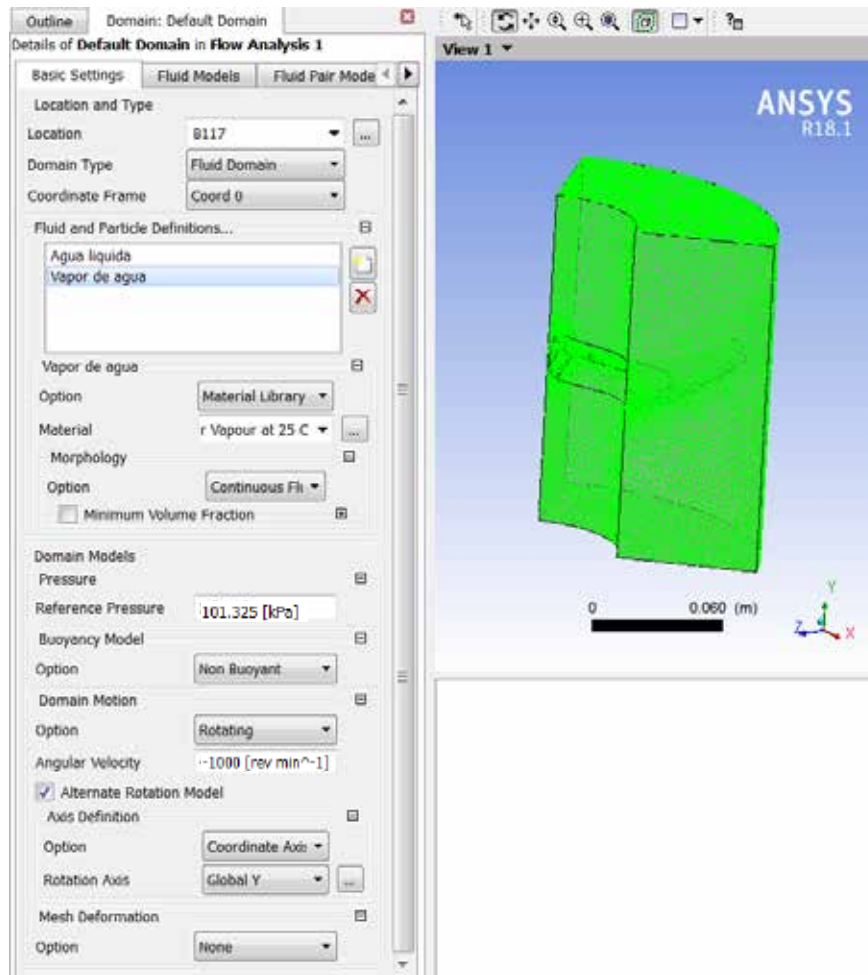
#### 4.3.3.1 Ajustes básicos (Basic Settings)

En un principio, se configura los parámetros que rigen el dominio, para seleccionar todo dominio se ubica por medio del comando location, una vez encontrado, se selecciona “Fluid Domain” como tipo de dominio, posteriormente se inserta los tipos de fluidos necesarios, el primero que se selecciona es el indicado por el programa como “Water” y se representara como Agua líquida, después el tipo de material, se selecciona Water, segundo se inserta el fluido “Water Vapor at 25°C” representado como vapor de agua, después se terminan de configurar las opciones como lo son; la presión de referencia a 101,325Kpa, la rotación a (1000rpm) el cual será negativo por el sentido de la rotación, también se activa Alternate Rotation Model y la opción Rotating en el eje Y.



**Figura 34.** Ajustes básicos del Agua líquida del dominio.

Fuente: Mier y Terán (2019)

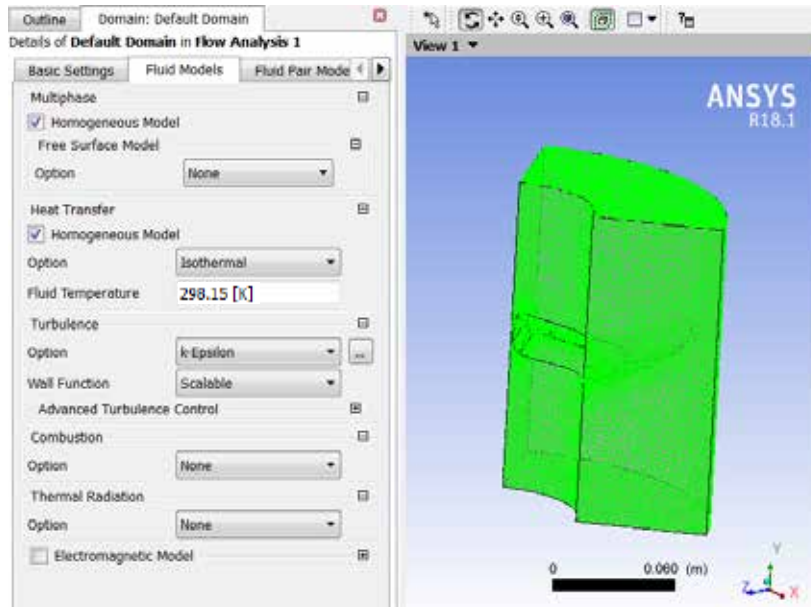


**Figura 35.** Ajustes básicos del Vapor de agua del dominio.

Fuente: Mier y Terán (2019)

#### 4.3.3.2 Modelos de fluidos (Fluid Models)

Se configura el modelo homogéneo y de transferencia de calor más recomendable para realizar la simulación numérica. Para este trabajo se utilizó como modelo de turbulencia, el modelo Kappa-Epsilon ( $k$ -adequado para analizar los fenómenos. Se considera que el fluido se comporta como una sustancia pura, para facilitar los cálculos. Como modelo energético de transferencia de calor, se selecciona el modelo isotérmico, ya que establece que el fluido no varía su temperatura a lo largo de su recorrido por todo el dominio, por lo que se establece 298,15°K como la temperatura del agua.

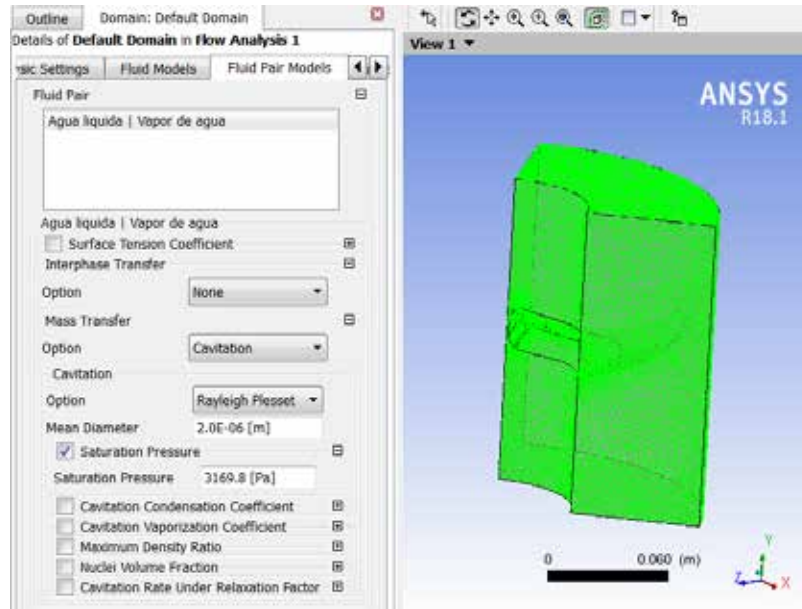


**Figura 36.** Configuración con transferencia de calor isotérmica a 298,15°K con turbulencia k-

Fuente: Mier y Terán (2019)

#### 4.3.3.3 Modelos de pares de fluidos (Fluid Pair Models)

Luego se activa en la opción de modelos de flujos pares, la cavitación sobre la sección de transferencia de masa; se selecciona el modelo matemático de cavitación Rayleigh Plesset y luego se activa la presión de saturación asignándole un valor de 3169,8 Pa como presión de saturación del agua a una temperatura de 298,15°K, el cual es el caso de estudio. Es importante mencionar que el modelo de cavitación usado es el de Rayleigh – Plesset, ya que muestra el crecimiento y colapso de las burbujas de vapor en un dominio líquido.

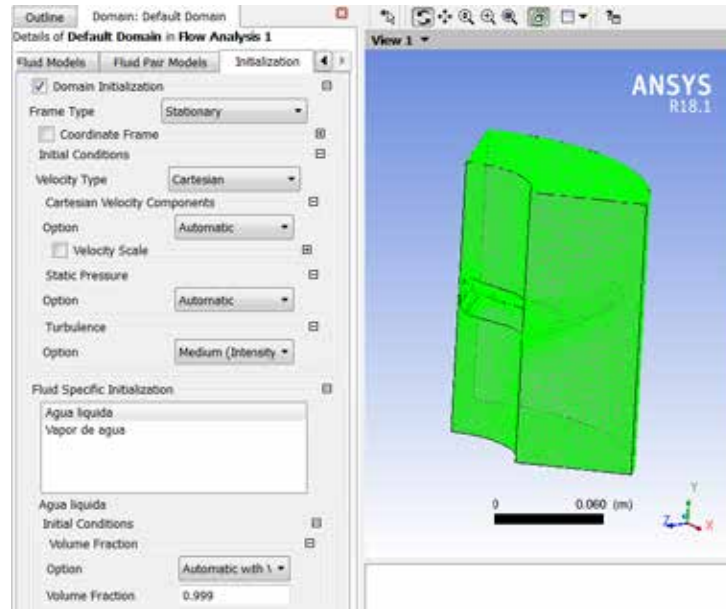


**Figura 37.** Configuración de la simulación considerando la cavitación, introducción del modelo de cavitación Rayleigh Plesset y la presión de saturación.

Fuente: Mier y Terán (2019)

#### 4.3.3.4 Inicialización (Initialization)

Después, se asigna la condición de inicialización en todo el dominio, con un valor de fracción de volumen de agua líquida 0,999% y vapor de agua 0,001 a 298,15°K, como automático, es decir, el software empezará a buscar la solución de las ecuaciones de gobierno desde un valor automático de fracción de volumen hasta llegar a la convergencia numérica de las ecuaciones.



**Figura 38.** Configuración de fracción de volumen de los fluidos.

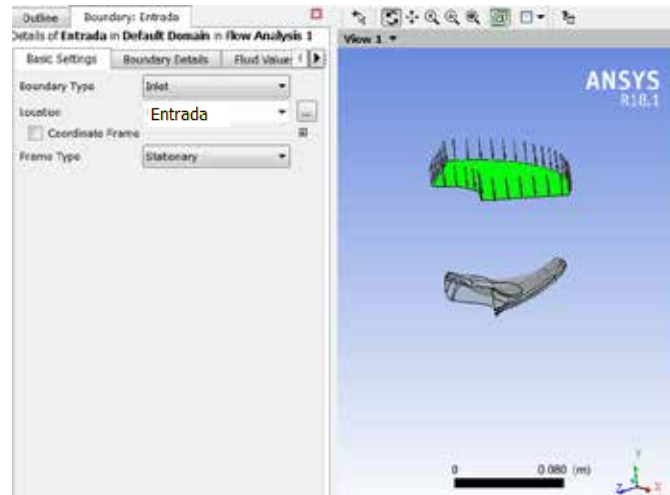
Fuente: Mier y Terán (2019)

#### 4.3.3.5 Establecimiento de las condiciones de borde.

Se asigna sobre las superficies de todo el dominio, las propiedades físicas y características conocidas de estas superficies, a partir del cual las ecuaciones de gobierno se resolverán.

Se asignan cuatro condiciones de borde, la primera es la entrada del álabe correspondiente al rotor, ubicada en la superficie de entrada del impulsor llamada “Inlet”, la segunda condición es la salida del rotor, llamada “Outlet” ubicada a la salida del dominio, la tercera es la condición de borde de pared llamada “Wall” ubicada en el exterior del cilindro, la cuarta es la condición de borde de pared llamada “Wall” ubicada en el interior del cilindro

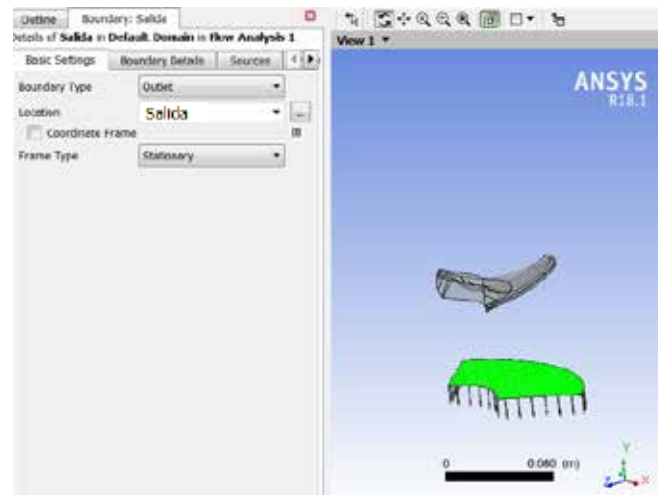
Se procede a configurar la condición de borde “Entrada” como condición de borde de tipo inlet: en; la ubicación de la misma sobre la superficie de entrada al impulsor es asignada automáticamente por el programa de análisis numérico, debido a que previamente en el proceso de mallado se le asignó a esta superficie el nombre de “Entrada”; posteriormente se establece esta condición de borde como estacionaria



**Figura 39.** Configuración de la entrada “Inlet”

Fuente: Mier y Terán (2019)

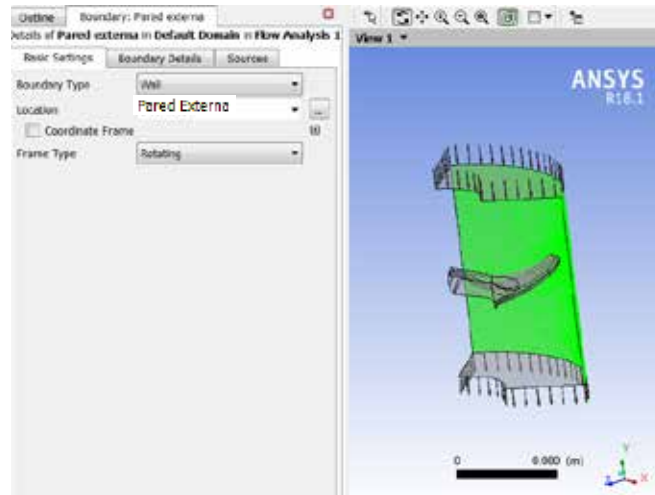
A continuación, se configura de igual modo la condición de borde “Salida” de tipo Outlet ubicada en la parte baja del dominio.



**Figura 40.** Configuración de la salida “Outlet”

Fuente: Mier y Terán (2019)

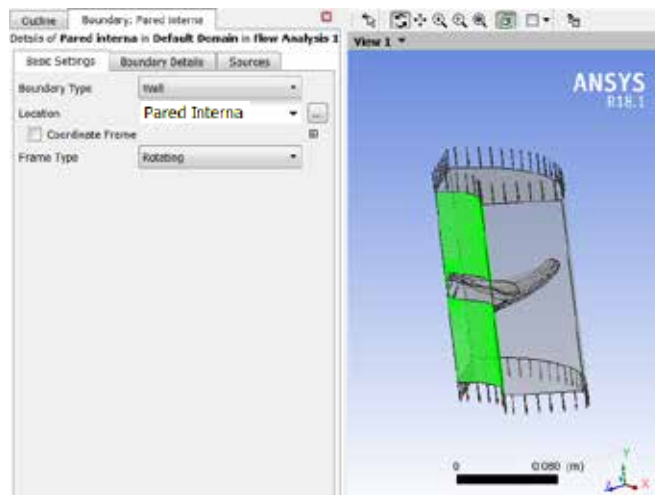
Seguidamente se configura la condición de borde “Pared Externa” de tipo Wall, ubicada en la parte externa del cilindro correspondiente al dominio.



**Figura 41.** Configuración de la pared externa “Wall”

Fuente: Mier y Terán (2019)

De igual modo, se configura la condición de borde “Pared Interna” de tipo Wall, ubicada en la parte interna del cilindro correspondiente al dominio.

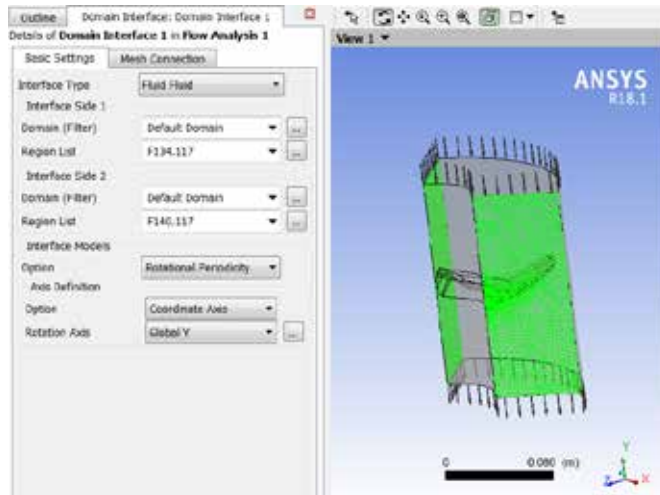


**Figura 42.** Configuración de la pared interna “Wall”

Fuente: Mier y Terán (2019)

A continuación, se introduce la configuración de interface en las condiciones de borde del dominio correspondiente a las caras restantes, También es necesario

indicar que será una rotación de tipo periódica en el dominio y el eje de rotación estará en el eje Y



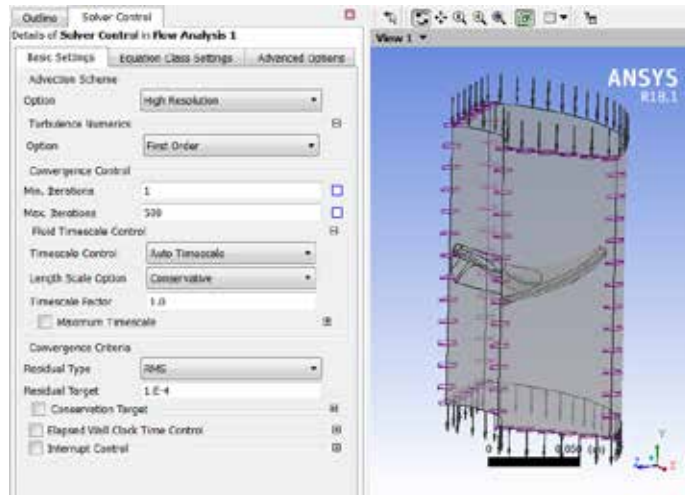
**Figura 43.** Configuración de la interface

Fuente: Mier y Terán (2019)

#### 4.3.3.6 Configuración de Solver

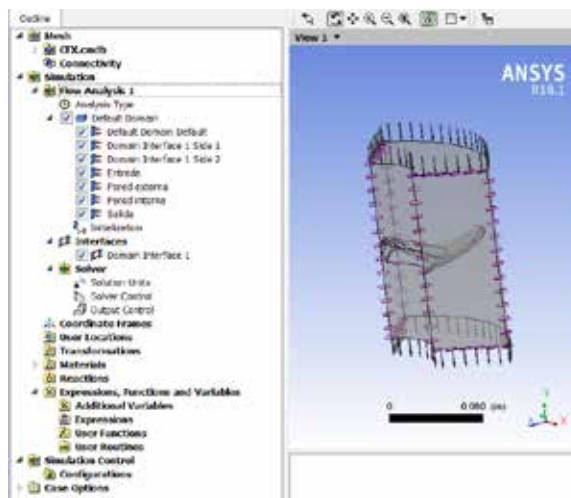
La configuración del Solver, se refiere a los criterios de convergencia que tendrá el software a la hora de realizar los cálculos, para esto se ingresa al panel de configuración solver control como se muestra en la Figura 44. Es acá donde se especifica el número máximo de iteraciones o pasos a realizar para la convergencia, así como el valor objetivo del criterio de convergencia ya sea MAX o RMS.

Para el criterio de convergencia residual se coloca 1.E-4, este valor se selecciona de acuerdo a las recomendaciones del manual de teoría del procesador de ecuaciones. Para garantizar la convergencia de la solución se colocan 500 iteraciones como límite, valor que se toma luego de realizar varias pruebas a diferentes iteraciones.



**Figura 44.** Configuración básica de Solver

Fuente: Mier y Terán (2019)



**Figura 45.** Resultado final de todas las configuraciones del dominio, condiciones de borde, interfaces e interacciones.

Fuente: Mier y Terán (2019)

#### 4.4 Obtención de los resultados en forma de datos, gráficos o videos para su análisis mediante una herramienta computacional de procedimiento matemático

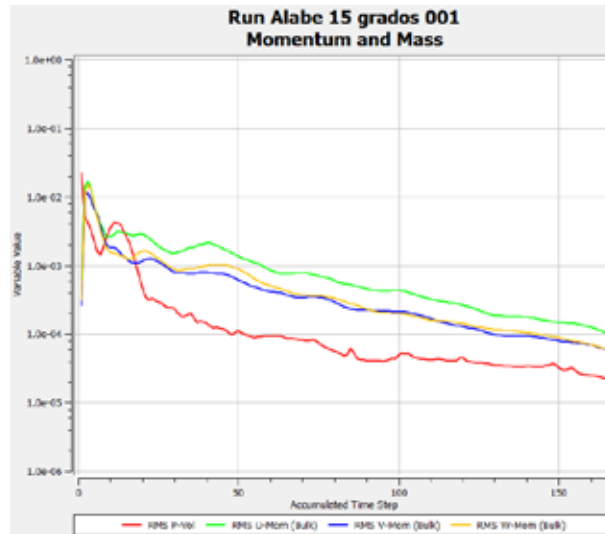
Se presentan los resultados obtenidos a través de contornos de presión, velocidad y fracción de volumen de vapor en gráficas y planos del dominio estudiado.

#### **4.4.1 Convergencia de las simulaciones**

Mediante el uso de un procesador de ecuaciones incluido en el software ANSYS® CFX®, se procede a la resolución de las ecuaciones. Se fija un valor de RMS de 0,0001 ( $1 \times 10^{-4}$ ) como criterio de convergencia, el cual es un valor conservador para las recomendaciones del fabricante del software de CFD las cuales para problemas relacionados de ingeniería lo sugiere. De igual modo se selecciona un número máximo de 500 iteraciones, esto con la finalidad de buscar que el objetivo residual sea el criterio principal de convergencia.

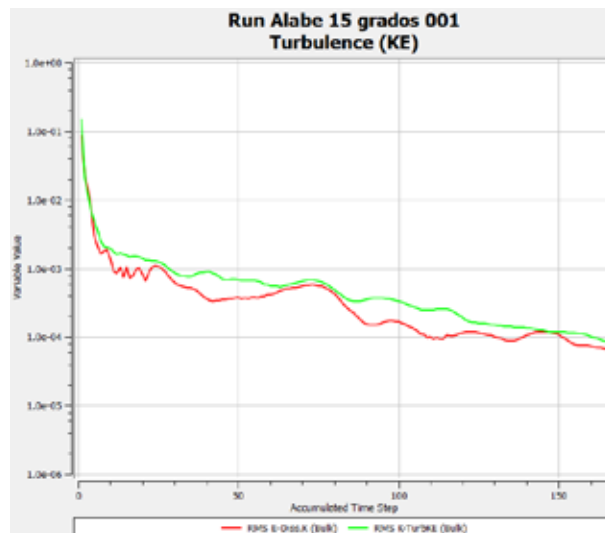
La finalidad del análisis CFD es resolver ecuaciones de conservación (conservación de la masa, cantidad de movimiento, modelo de turbulencia, ecuación de la energía, modelos adicionales para cerrar el sistema de ecuaciones, Rayleigh – Plesset, entre otras). Por lo tanto, el análisis de las curvas de conservación para todos los estados de la simulación es vital para asegurar una correcta simulación. Se presenta en las gráficas siguientes, los resultados de las simulaciones, siendo referencia al comportamiento de las curvas de convergencia para las leyes de conservación de masa y momento, a una presión de salida de 3169,8 Pa.

En las gráficas 1 y 2, se puede apreciar que la convergencia de las ecuaciones para el modelo de turbulencia y la frecuencia residual que fue lograda, anticipadamente en álabes orientados a 15°. Este análisis es análogo para todos los estados de estudio, debido a que la simulación se comporta de manera similar, obteniendo curvas de convergencia con resultados equivalentes.



**Gráfica 1.** Representación gráfica de convergencia de Masa y Momento para  $P=3169,8$  Pa con álabes del rotor orientados a  $15^\circ$

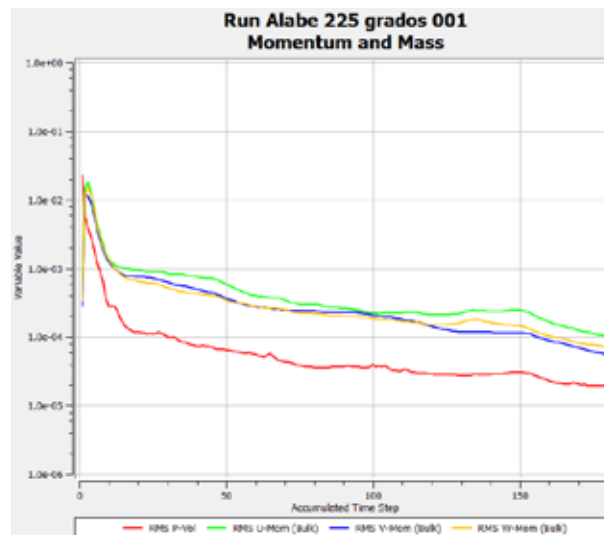
Fuente: Mier y Terán (2019)



**Gráfica 2.** Representación gráfica de convergencia de Turbulencia para  $P=3169,8$  Pa con álabes del rotor orientados a  $15^\circ$

Fuente: Mier y Terán (2019)

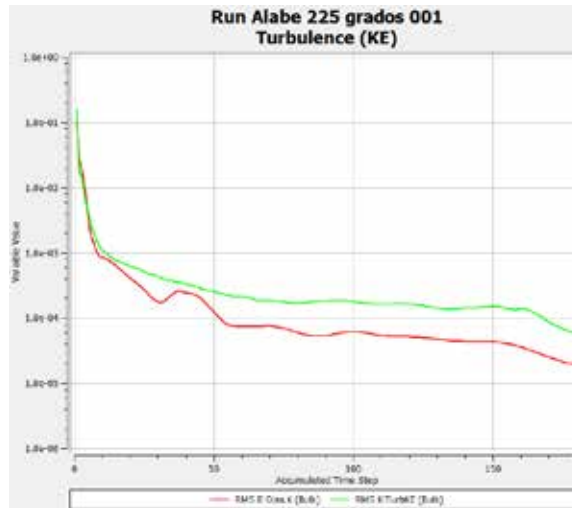
De mismo modo, se puede observar en la gráfica 3 que los residuos de las ecuaciones de masa (P-Mass) y momento (U-Mom, V-Mom y W-Mom) alcanzan la convergencia a 180 iteraciones, en este punto se logró alcanzar tanto el criterio de convergencia RMS como el de Imbalance en todo el dominio fluidizado en el rotor, con álabes orientados a 22.5°.



**Gráfica 3.** Representación gráfica de convergencia de Masa y Momento para  $P= 3169,8$  Pa con álabes del rotor orientados a 22.5°

Fuente: Mier y Terán (2019)

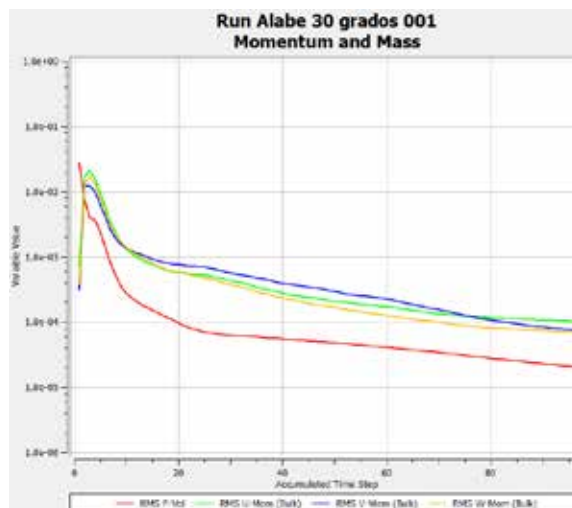
En la gráfica 4, se puede apreciar como las ecuaciones de turbulencia alcanzan valores de RMS entre  $1E10^{-4}$  y  $1E10^{-5}$  con álabes orientados 22.5°. La evaluación del criterio de convergencia para el modelo de turbulencia, se basa en que a medida que el valor RMS de las ecuaciones se reduzca, el resultado será aún más preciso y se podrá considerar la convergencia de las soluciones de las ecuaciones de turbulencia. Este comportamiento se repite en todas las simulaciones realizadas en este trabajo.



**Gráfica 4.** Representación gráfica de convergencia de Turbulencia para  $P= 3169,8$  Pa con álabes del rotor orientados a  $22.5^\circ$

Fuente: Mier y Terán (2019)

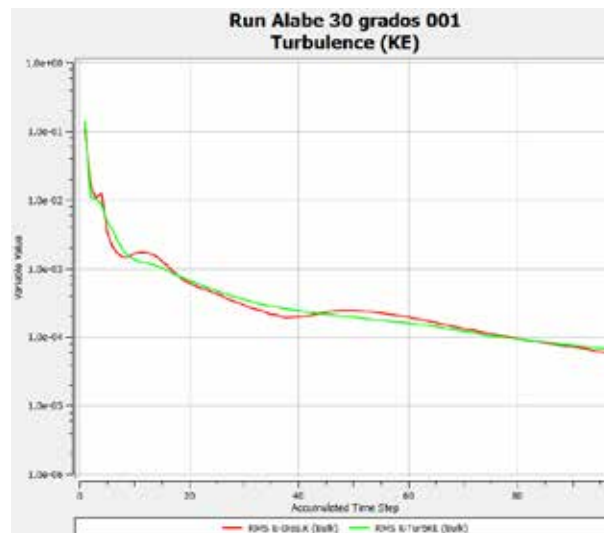
En la gráfica 5 se puede ver la convergencia de las ecuaciones de masa y momento al valor de RMS de  $1E10-4$ , alcanzada con 95 iteraciones, es decir, que esta simulación con álabes a  $30^\circ$ , convergió más rápido que con los álabes orientados a  $15^\circ$  y  $22.5^\circ$ .



**Gráfica 5.** Representación gráfica de convergencia de Masa y Momento para  $P= 3169,8$  Pa con álabes del rotor orientados a  $30^\circ$

Fuente: Mier y Terán (2019)

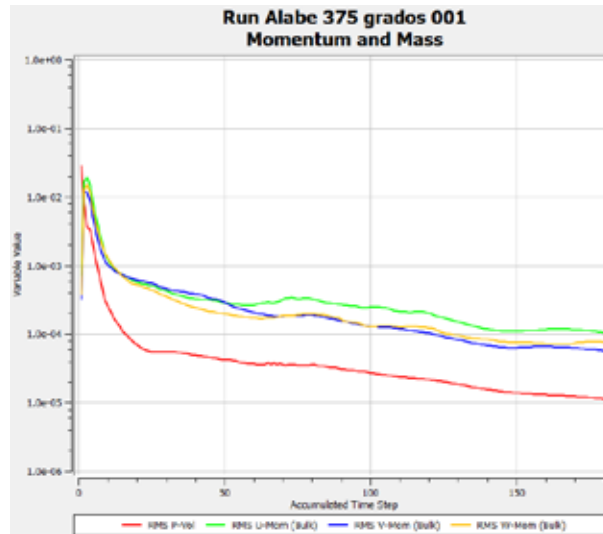
Al observar la gráfica 6, se evidencia que las ecuaciones de turbulencia convergieron a valores de RMS entre  $1E10^{-4}$  y  $1E10^{-5}$ , alcanzando las 95 iteraciones con los álabes orientados a  $30^\circ$ , lo cual es un buen indicio de que el modelo de turbulencia tiene alta precisión en sus cálculos, ya que sus residuos van decreciendo a medida que aumenta el número de iteraciones.



**Gráfica 6.** Representación gráfica de convergencia de Turbulencia para  $P= 3169,8$  Pa con álabes del rotor orientados a  $30^\circ$

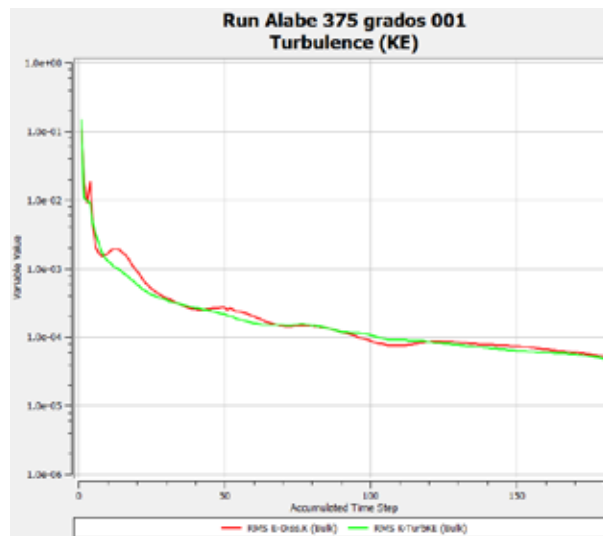
Fuente: Mier y Terán (2019)

Para la gráfica 7 se observa que con los álabes orientados a  $37.5^\circ$  se alcanzó la convergencia al valor de RMS de  $1E10^{-4}$ , al llegar a 180 iteraciones al igual que los álabes a  $22.5^\circ$ , igualmente se evidencia en la gráfica 8 la tendencia decreciente del RMS de las ecuaciones de turbulencia.



**Gráfica 7.** Representación gráfica de convergencia de Masa y Momento para  $P= 3169,8$  Pa con álabes del rotor orientados a  $37.5^\circ$

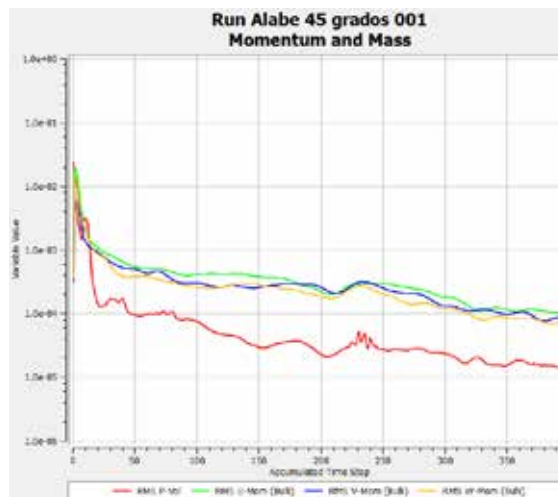
Fuente: Mier y Terán (2019)



**Gráfica 8.** Representación gráfica de convergencia de Turbulencia para  $P= 3169,8$  Pa con álabes del rotor orientados a  $37.5^\circ$

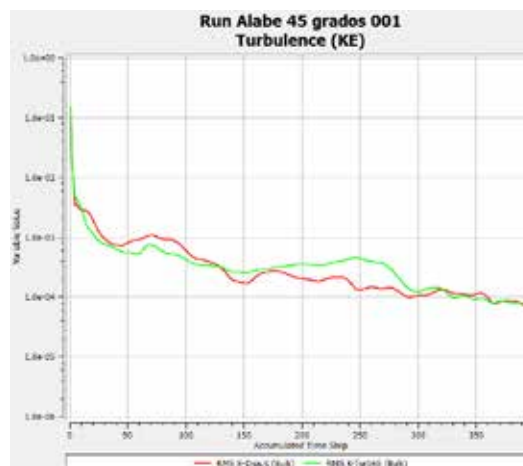
Fuente: Mier y Terán (2019)

Se puede observar en la gráfica 9 que se alcanzó la convergencia al valor de RMS de  $1E10^{-4}$ , al llegar a 390 iteraciones, es decir que esta simulación, con álabes orientados a  $45^\circ$ , es por mucho la que más iteraciones realizo para que finalizara de calcular el programa, igualmente se evidencia en la gráfica 10 la tendencia decreciente del RMS de las ecuaciones de turbulencia con álabes a  $45^\circ$



**Gráfica 9.** Representación gráfica de convergencia de Masa y Momento para  $P=3169,8$  Pa con álabes del rotor orientados a  $45^\circ$

Fuente: Mier y Terán (2019)



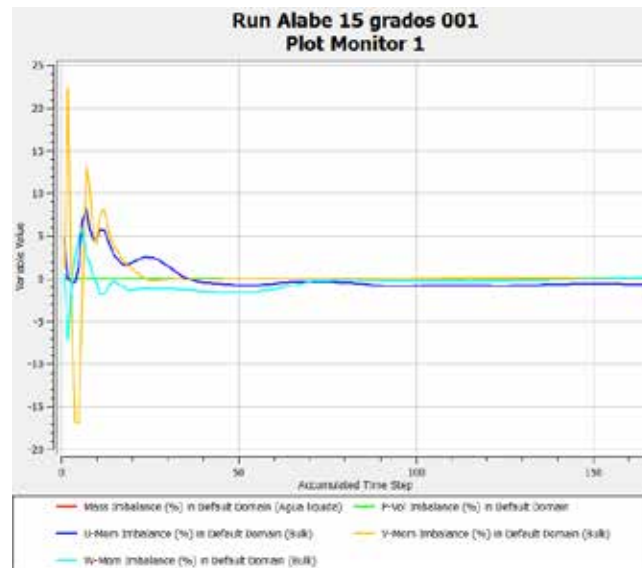
**Gráfica 10.** Representación gráfica de convergencia de Turbulencia para  $P=3169,8$  Pa con álabes del rotor orientados a  $45^\circ$

Fuente: Mier y Terán (2019)

**Tabla 2.** Valores residuales RMS de la convergencia para álabes del rotor orientados a 15°, 22.5°, 30°, 37.5°, 45°

Convergencia	U-Mom	V-Mom	W-Mom	P-Vol
Grados álabes	RMS	RMS	RMS	RMS
15°	9.9E-05	5.6E-05	5.8E-05	2.1E-05
22.5°	9.9E-05	5.4E-05	7.1E-05	1.9E-05
30°	9.9E-05	7.3E-05	6.8E-05	2.0E-05
37.5°	9.7E-05	5.3E-5	7.1E-05	1.0E-05
45°	9.9E-05	8.1E-05	7.2E-05	1.3E-05

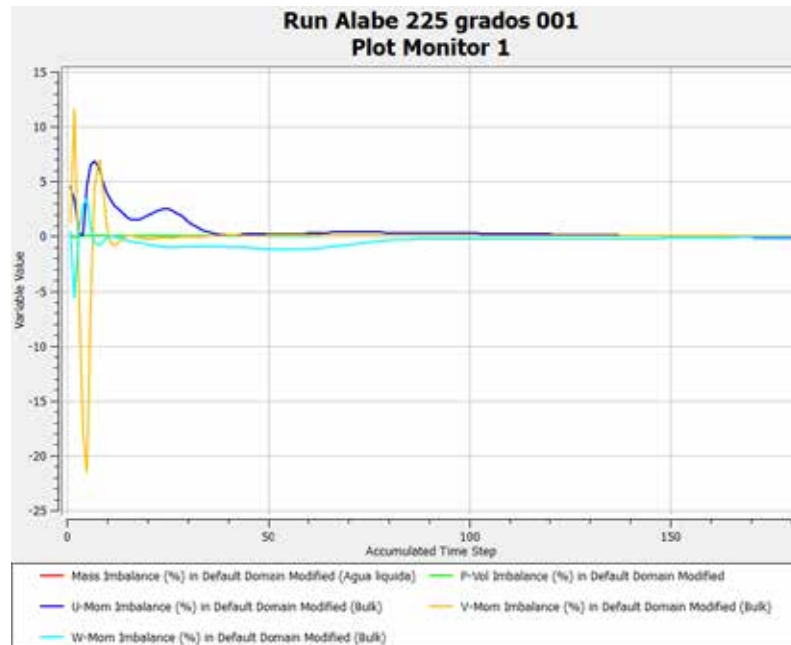
Se observa en la gráfica 11, que, al llegar la simulación a un número de iteraciones de 160, las ecuaciones de masa y momento se estabilizan. Esto indica que las ecuaciones se están conservando entre la entrada y salida del dominio para álabes orientados a 15° en la simulación.



**Gráfica 11.** Imbalance en el dominio de álabes del rotor orientados a 15° para condiciones de borde de  $P=-101.325$  KPa y  $e=20$  m<sup>3</sup>/h.

Fuente: Mier y Terán (2019)

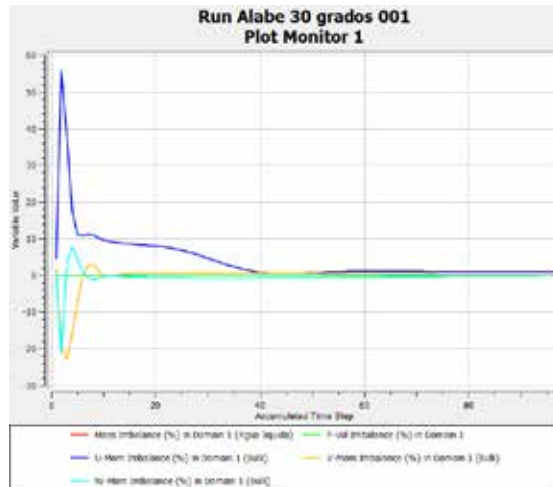
Se evidencia en la gráfica 12, que, de mismo modo que la simulación anterior (con álabes a 15°), al llegar a un número de iteraciones de 160, las ecuaciones de masa y momento se estabilizan entre la entrada y salida del dominio para álabes orientados a 22.5°.



**Gráfica 12.** Imbalance en el dominio de álabes del rotor orientados a 22.5° para condiciones de borde de  $P=-101.325$  KPa y  $e=20$  m<sup>3</sup>/h.

Fuente: Mier y Terán (2019)

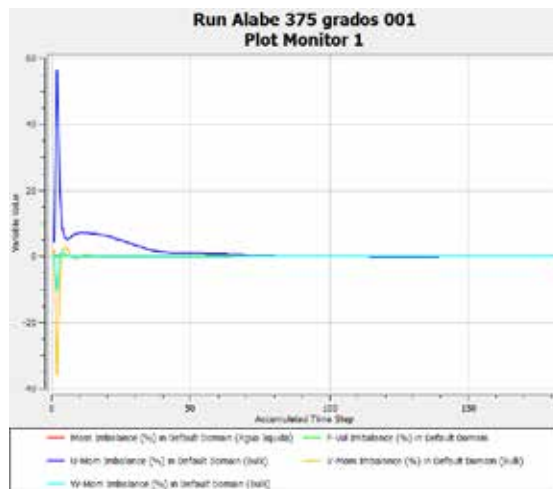
Se visualiza en la gráfica 13, que, al llegar la simulación a un número de iteraciones de 95, las ecuaciones de masa y momento se estabilizan. Esto indica que las ecuaciones se están conservando entre la entrada y salida del dominio para álabes orientados a 30° en la simulación.



**Gráfica 13.** Imbalance en el dominio de álabes del rotor orientados a 30° para condiciones de borde de  $P=-101.325$  KPa y  $e=20$  m<sup>3</sup>/h.

Fuente: Mier y Terán (2019)

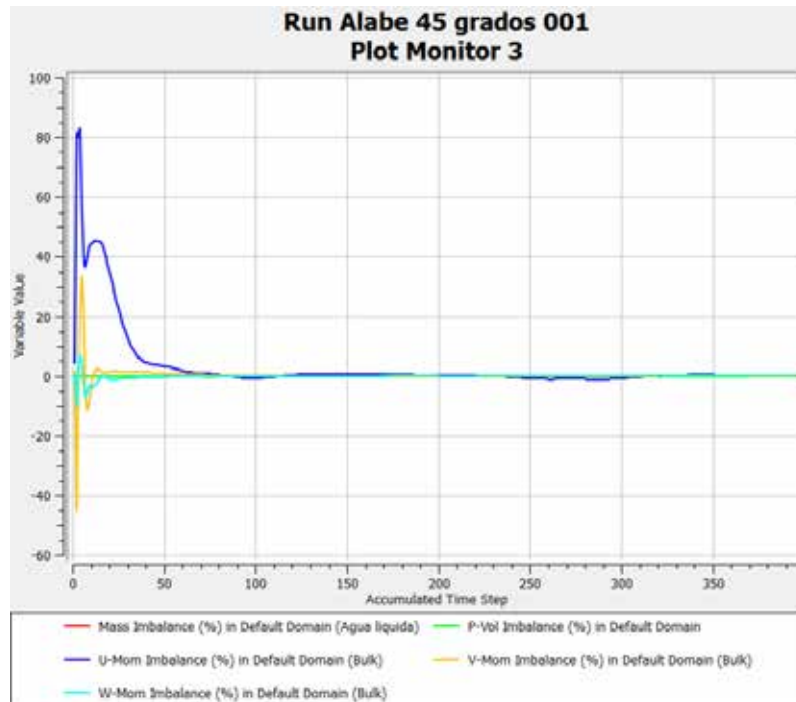
Se percibe en la gráfica 14, que, al llegar la simulación a un número de iteraciones de 140, las ecuaciones de masa y momento se estabilizan, indicando que las ecuaciones se están conservando entre la entrada y salida del dominio para álabes orientados a 37.5° en la simulación.



**Gráfica 14.** Imbalance en el dominio de álabes del rotor orientados a 37.5° para condiciones de borde de  $P=-101.325$  KPa y  $e=20$  m<sup>3</sup>/h.

Fuente: Mier y Terán (2019)

Se aprecia en la gráfica 15, que, al llegar la simulación a un número de iteraciones de 350, las ecuaciones de masa y momento se estabilizan indicando que las ecuaciones se lograron conservar entre la entrada y salida del dominio para álabes orientados a 45°.



**Gráfica 15.** Imbalance en el dominio de álabes del rotor orientados a 45° para condiciones de borde de  $P=-101.325$  KPa y  $e=20$  m<sup>3</sup>/h.

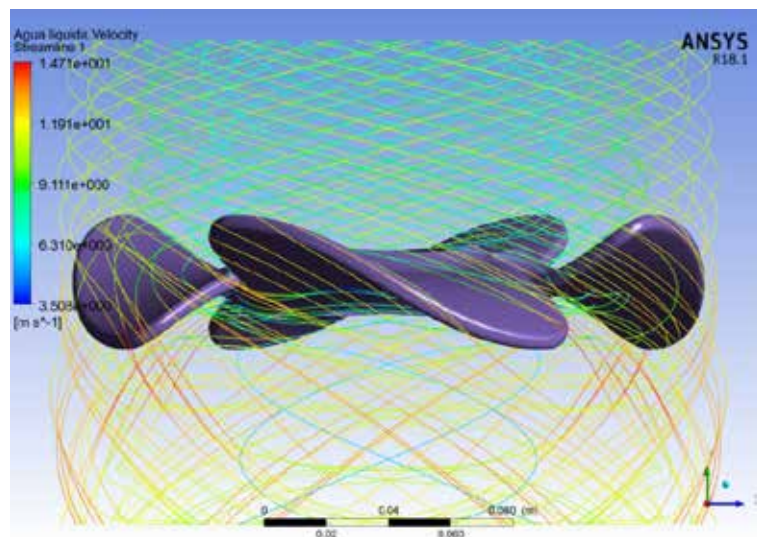
Fuente: Mier y Terán (2019)

#### 4.4.2. Estudio del campo de flujo para el rotor de la turbina Kaplan

Para el análisis de las líneas de flujo y del vapor de agua que se generan en el rotor, depende de la posición de los ángulos de los álabes. Se puede decir que dicha variación de cada uno de ellos dependerá de la trayectoria del flujo desde la entrada del dominio hasta la salida. A continuación, se mostrará los resultados dependiendo de la orientación de los álabes.

#### 4.4.2.1. Estudio del campo de flujo para álabes orientados a 15°

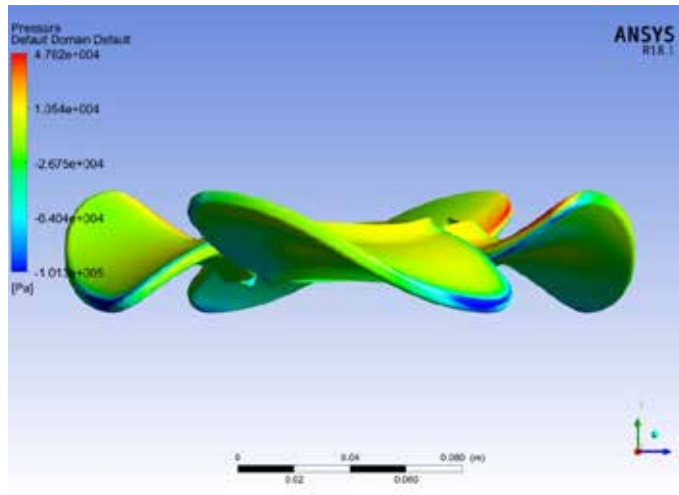
En la Figura 46, se muestra la velocidad en las líneas de corriente “Streamline” que representan el flujo del dominio a través de los álabes orientados a 15° como también se puede observar como la menor velocidad (regiones de color azul celeste), dan forma a un torbellino de menor diámetro, ubicado bajo los álabes y llegan hasta la salida del dominio, mientras que las regiones de mayor velocidad (regiones de color rojo), se encuentran como un torbellino de mayor diámetro en la parte baja de los álabes, hasta la salida del dominio.



**Figura 46.** Perfil de Velocidad en álabes orientados a 15°

Fuente: Mier y Terán (2019)

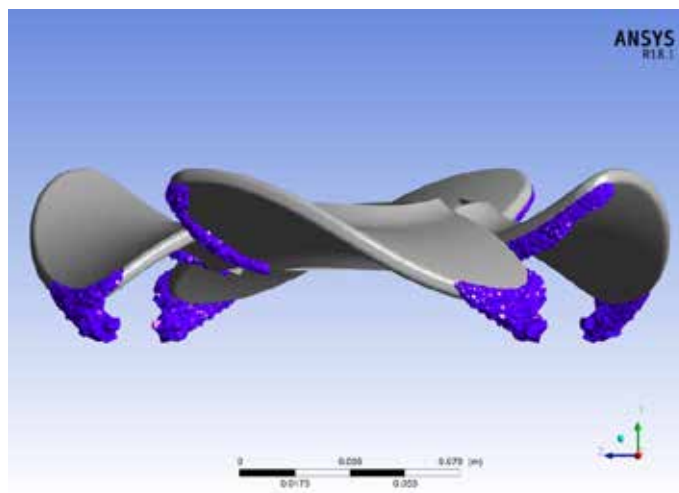
En la Figura 47, se observa el perfil de presión sobre la superficie de álabes a 15°, se puede observar para los resultados, las zonas de los álabes en donde el fluido entra y hace contacto en un principio, se encuentra la mayor presión de  $1,054E+4$  Pa hasta  $4,782E+4$  Pa, mientras que en los extremos donde el fluido hace el último contacto con los álabes, la presión tiende a bajar o disminuir desde  $(-6,404E+4$  hasta  $-1,013E+5)$  Pa.



**Figura 47.** Perfil de presión en álabes orientados a 15°

Fuente: Mier y Terán (2019)

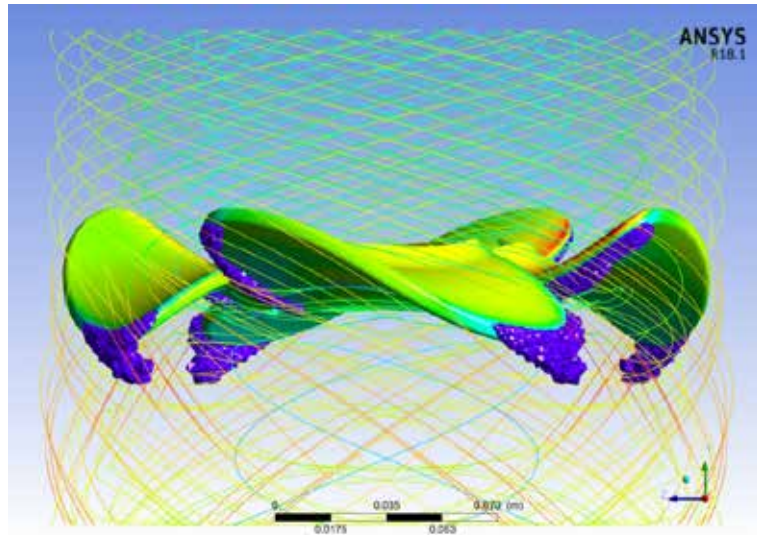
En la Figura 48, se muestra los álabes orientados a 15° y las burbujas o el volumen de vapor de agua representado (de color morado) en gran cantidad. Este vapor el cual es el causante del fenómeno de cavitación en la superficie de los álabes, se forma en las zonas de baja presión que se observan anteriormente en la figura 47. Y este vapor se extiende en los bordes tanto en el comienzo como en la salida de los álabes.



**Figura 48.** Volumen de vapor de agua en álabes orientados a 15°

Fuente: Mier y Terán (2019)

En la Figura 49 se puede observar el conjunto las figuras anteriores 46, 47 y 48, en una sola composición, demostrando los perfiles de velocidad, presión y cavitación del rotor con álabes a  $15^\circ$  en una sola imagen.

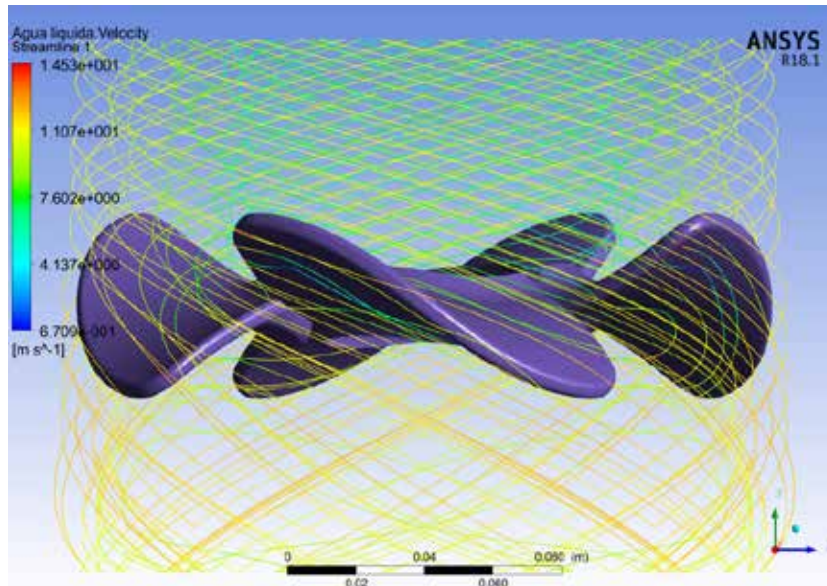


**Figura 49.** Vista de conjunto de perfiles de velocidad, presión y cavitación en los álabes orientados a  $15^\circ$

Fuente: Mier y Terán (2019)

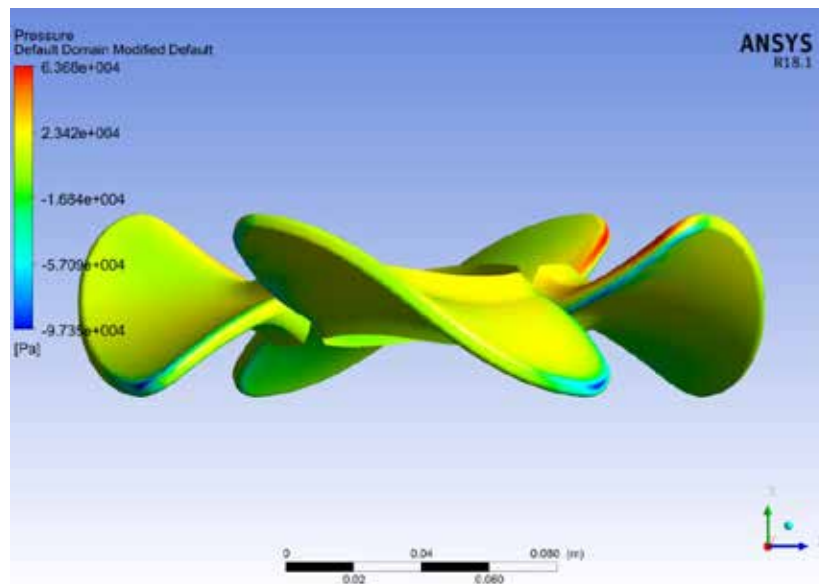
#### **4.4.2.2. Estudio del campo de flujo para álabes orientados a $22.5^\circ$**

Se observan en las Figuras 50, 51 y 52, los perfiles de velocidad, presión y cavitación respectivamente, del rotor de la turbina Kaplan con álabes orientados a  $22.5^\circ$ , mostrando en el perfil de velocidad valores entre  $(1,280E+1$  y  $4,137)$ m/s, mientras que la presión fluctúa entre  $(-9,735E+4$  y  $6,368E+4)$ Pa, y presenta cavitación en cantidad significativa, aunque menor que con los álabes a  $15^\circ$ . También se visualiza el conjunto de los perfiles en la Figura 53.



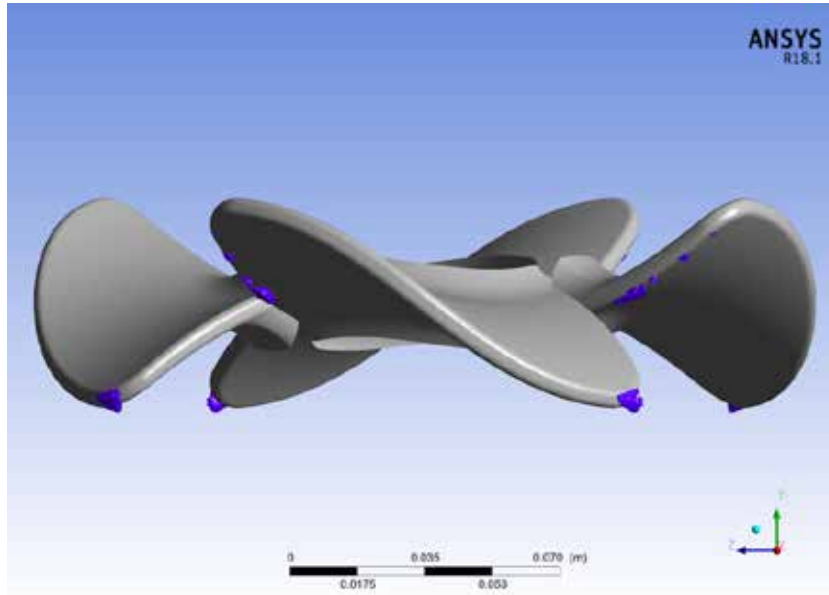
**Figura 50.** Perfil de Velocidad en álabes orientados a 22.5°

Fuente: Mier y Terán (2019)



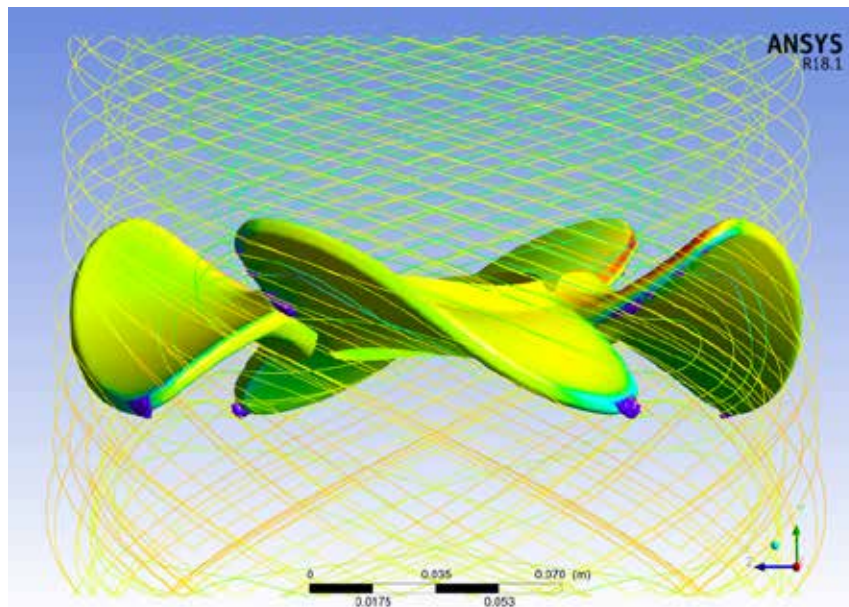
**Figura 51.** Perfil de presión en álabes orientados a 22,5°

Fuente: Mier y Terán (2019)



**Figura 52.** Perfil de cavitación en álabes orientados a  $22,5^\circ$

Fuente: Mier y Terán (2019)

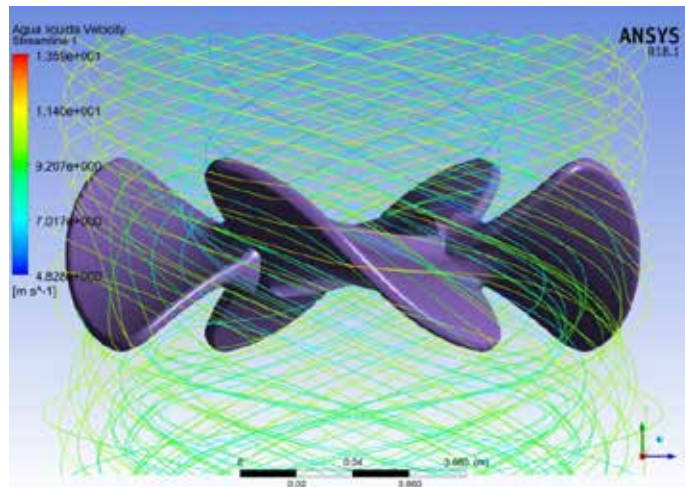


**Figura 53.** Vista de conjunto de perfiles de velocidad, presión y cavitación en los álabes orientados a  $22,5^\circ$

Fuente: Mier y Terán (2019)

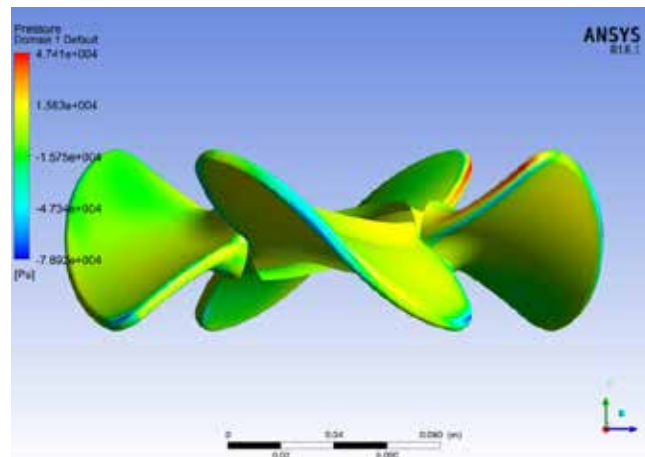
#### 4.4.2.3. Estudio del campo de flujo para álabes orientados a 30°

En las Figuras 54, 55 y 56, los perfiles de velocidad, presión y cavitación respectivamente, del rotor de la turbina Kaplan con álabes orientados a 30°, mostrando en el perfil de velocidad valores entre (1,140E+1 y 4,828)m/s, mientras que la presión fluctúa entre (-7,892E+4 y 4,741E+4)Pa, y no presenta cavitación. También se visualiza el conjunto de los perfiles en la Figura 57.



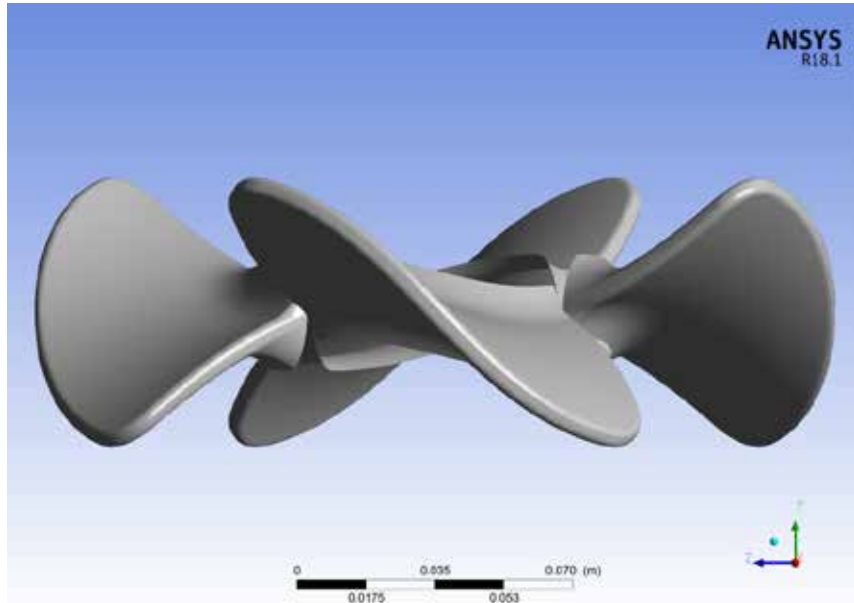
**Figura 54.** Perfil de Velocidad en álabes orientados a 30°

Fuente: Mier y Terán (2019)



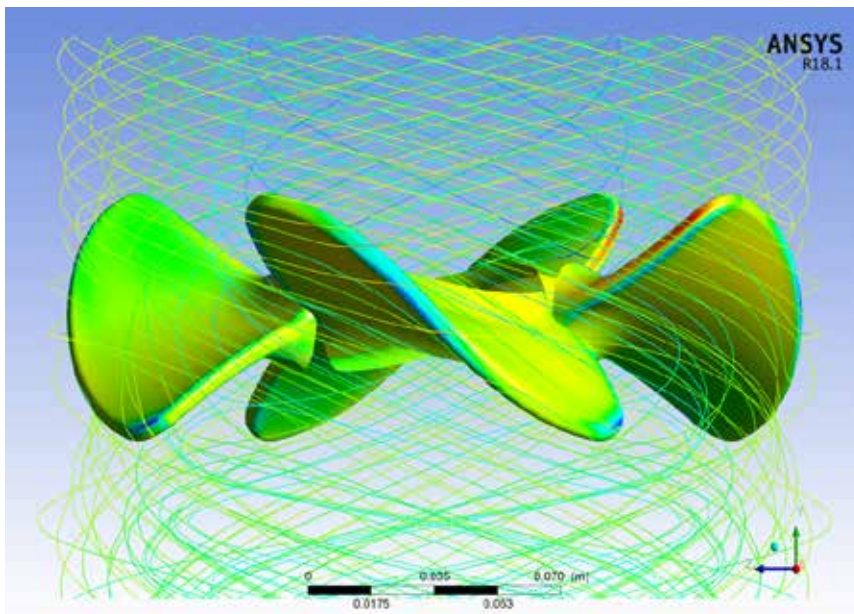
**Figura 55.** Perfil de presión en álabes orientados a 30°

Fuente: Mier y Terán (2019)



**Figura 56.** Perfil de cavitación en álabes orientados a 30°

Fuente: Mier y Terán (2019)

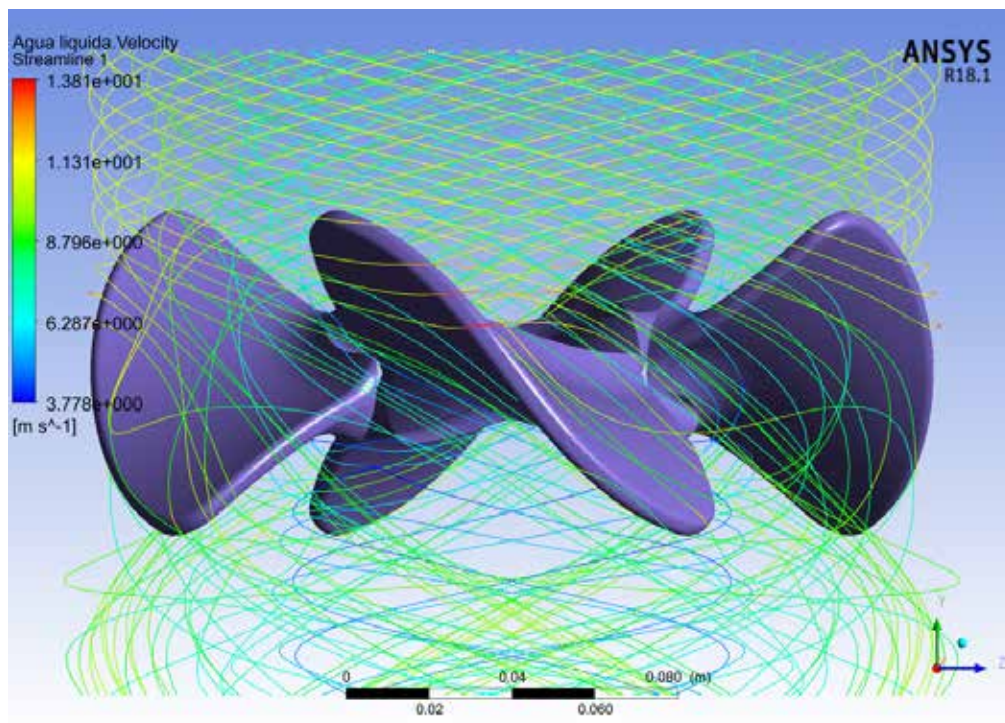


**Figura 57.** Vista de conjunto de perfiles de velocidad, presión y cavitación en los álabes orientados a 30°

Fuente: Mier y Terán (2019)

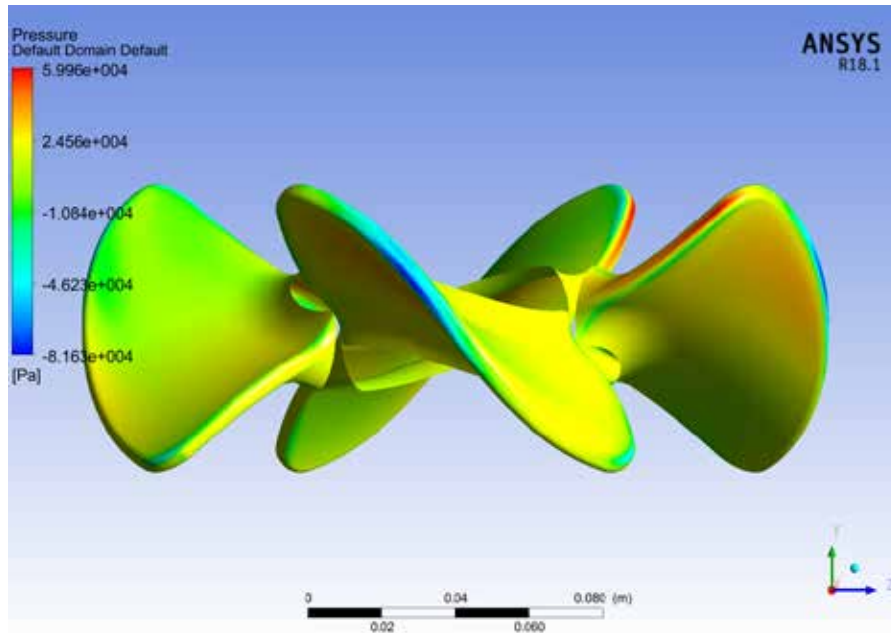
#### 4.4.2.4. Estudio del campo de flujo para álabes orientados a 37.5°

Se visualiza en las Figuras 58, 59 y 60, los perfiles de velocidad, presión y cavitación respectivamente, del rotor de la turbina Kaplan con álabes orientados a 33.7°, mostrando en el perfil de velocidad valores entre (1,381E+1 y 3,778)m/s, mientras que la presión fluctúa entre (-8,163E+4 y 5,996E+4)Pa, y presenta cavitación en pequeñas cantidades en el extremo de los álabes. También se visualiza el conjunto de los perfiles en la Figura 61.



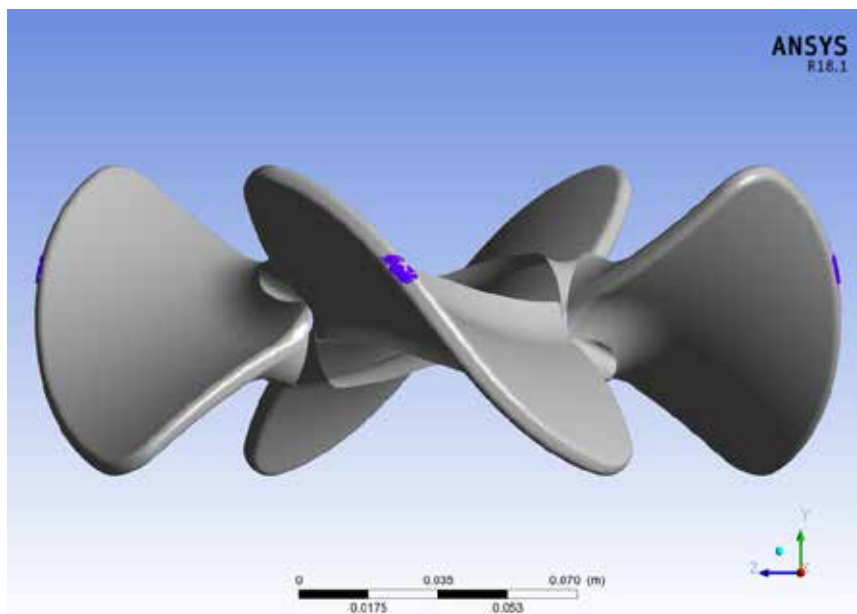
**Figura 58.** Perfil de Velocidad en álabes orientados a 37.5°

Fuente: Mier y Terán (2019)



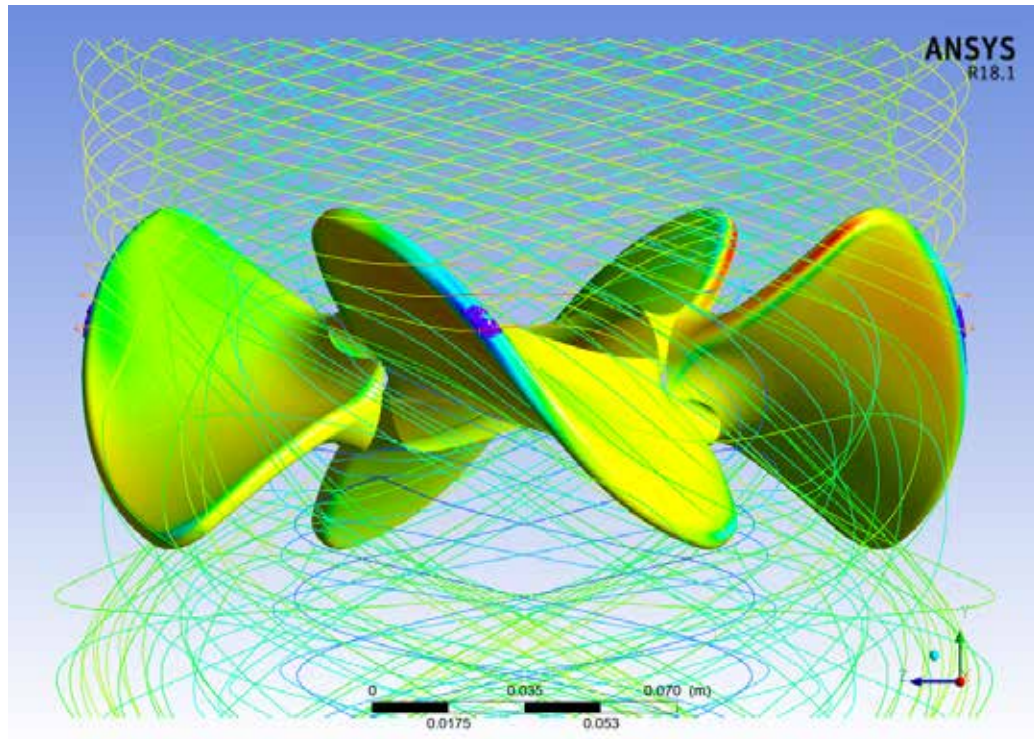
**Figura 59.** Perfil de presión en álabes orientados a 37,5°

Fuente: Mier y Terán (2019)



**Figura 60.** Perfil de cavitación en álabes orientados a 37,5°

Fuente: Mier y Terán (2019)

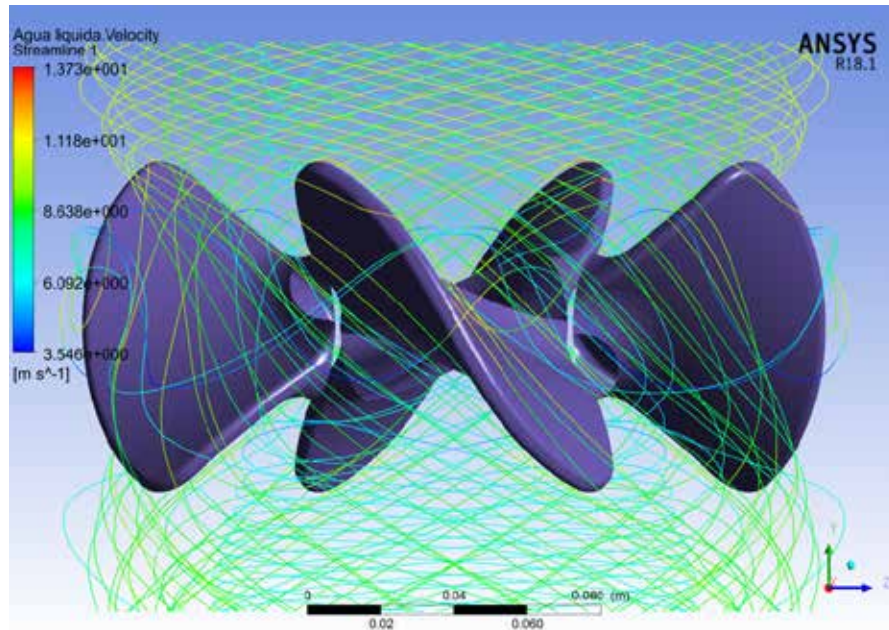


**Figura 61.** Vista de conjunto de perfiles de velocidad, presión y cavitación en los álabes orientados a 37,5°

Fuente: Mier y Terán (2019)

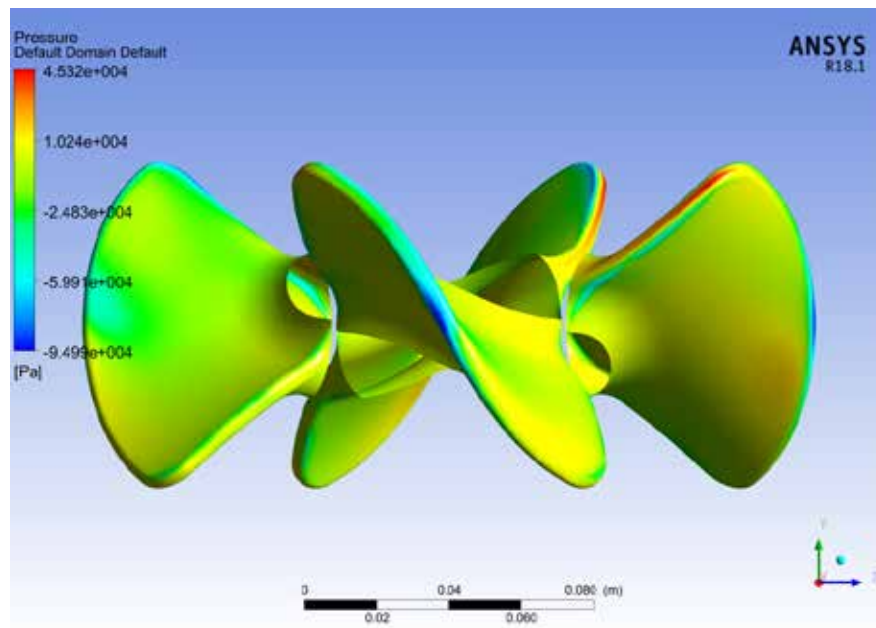
#### 4.4.2.5. Estudio del campo de flujo para álabes orientados a 45°

Se visualiza en las Figuras 62, 63 y 64, los perfiles de velocidad, presión y cavitación respectivamente, del rotor de la turbina Kaplan con álabes orientados a 45°, mostrando en el perfil de velocidad valores entre (1,373E+1 y 3,546)m/s, mientras que la presión fluctúa entre (-9,499E+4 y 4,532E+4)Pa, y presenta cavitación significativamente en el extremo de los álabes. También se visualiza el conjunto de los perfiles en la Figura 65.



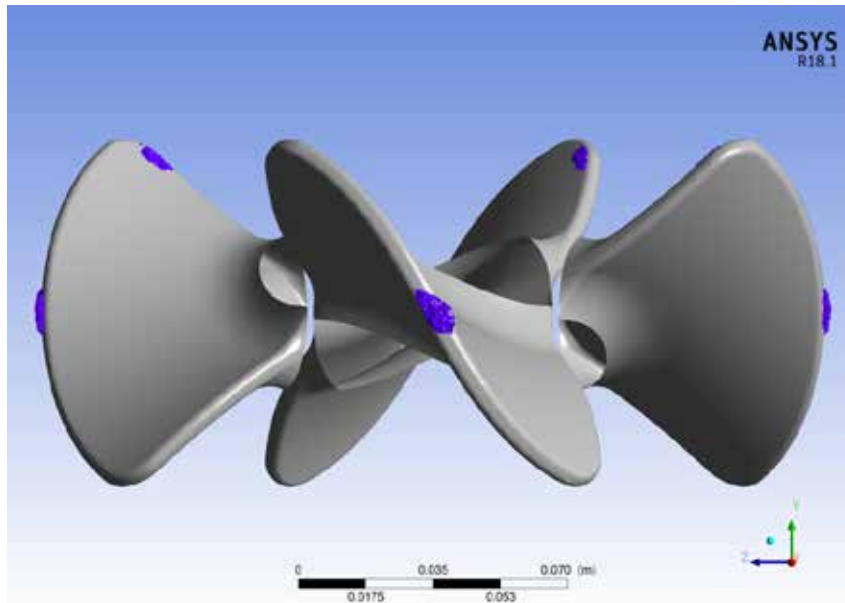
**Figura 62.** Perfil de Velocidad en álabes orientados a 45°

Fuente: Mier y Terán (2019)



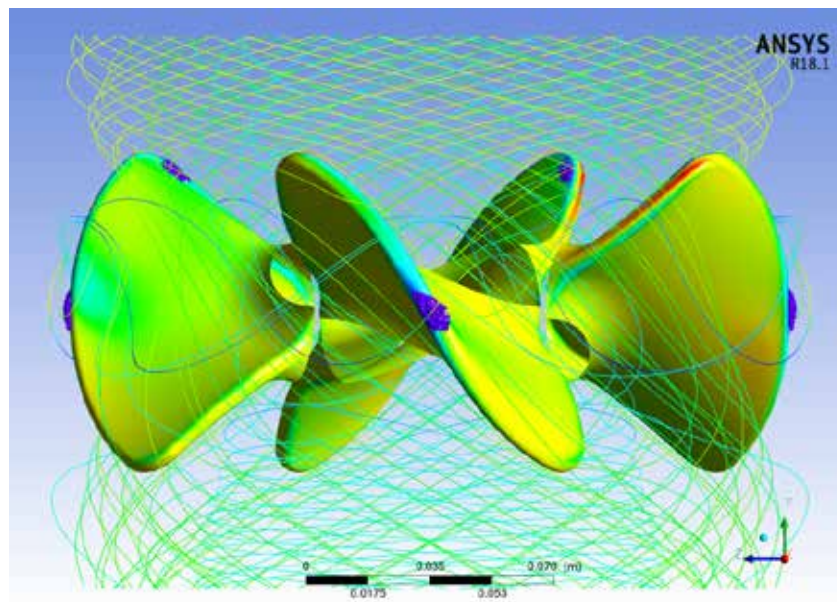
**Figura 63.** Perfil de presión en álabes orientados a 45°

Fuente: Mier y Terán (2019)



**Figura 64.** Perfil de cavitación en álabes orientados a 45°

Fuente: Mier y Terán (2019)

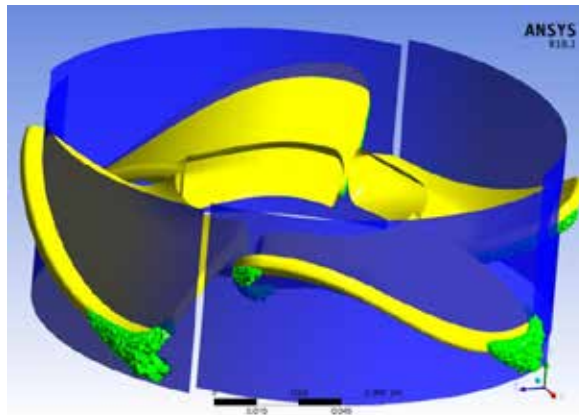


**Figura 65.** Vista de conjunto de perfiles de velocidad, presión y cavitación en los álabes orientados a 45°

Fuente: Mier y Terán (2019)

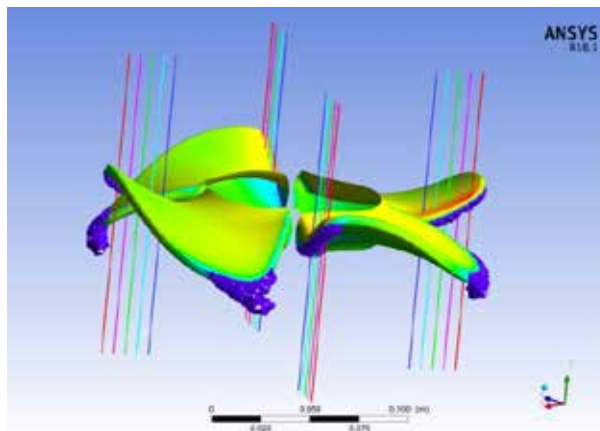
#### 4.4.3. Estudio de la cavitación en el rotor de la turbina Kaplan

Para el análisis de la cavitación el cual surge por el vapor de agua generado en el rotor, que depende de la orientación de los álabes, se visualizara la variación de cada uno de ellos, debido a la construcción de planos radiales que cortan gran parte del perfil de los álabes, cortando también el vapor de agua que se forma, así como se muestra en la Figura 66, por otro lado, se trazaron líneas en el eje Y, con coordenadas específicas las cuales atraviesan los álabes, como se muestra en la Figura 67, permitiendo medir y graficar dichas variaciones que inciden en la cavitación.



**Figura 66.** Planos que cortan el perfil de los álabes y el vapor de agua formado.

Fuente: Mier y Terán (2019)



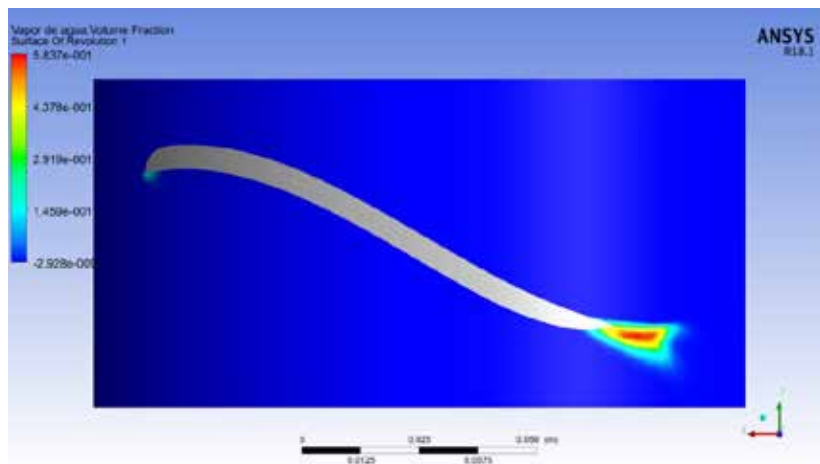
**Figura 67.** Líneas para medir el vapor de agua

Fuente: Mier y Terán (2019)

A continuación, se mostrará los resultados dependiendo de la orientación de los álabes.

#### 4.4.3.1. Fracciones de vapor de agua en planos radiales para los álabes orientados a 15°, 22.5°, 30°, 37.5° y 45°

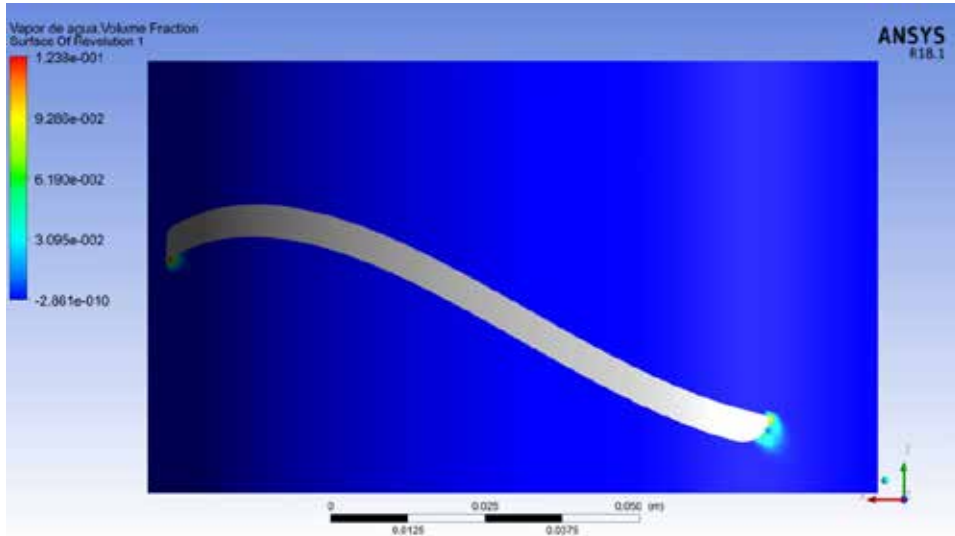
En la Figura 68, se muestra la fracción de volumen de vapor plasmada a lo largo del plano que corta el perfil del álabe a 15°, y se observa como en las zonas rojas, se concentra la mayor fracción de vapor, que representa la cavitación. De tal modo, se registra una fracción de vapor al principio del álabe (lado izquierdo inferior) es de alrededor de  $1,459\text{E}-1$  %, mientras que al final del álabe (lado derecho), se registran valores que comprenden los  $5,837\text{E}-1$ , siendo esta última, la zona más susceptible a la formación de burbujas y cavitación.



**Figura 68.** Fracción de vapor de agua en álabe orientado a 15°

Fuente: Mier y Terán (2019)

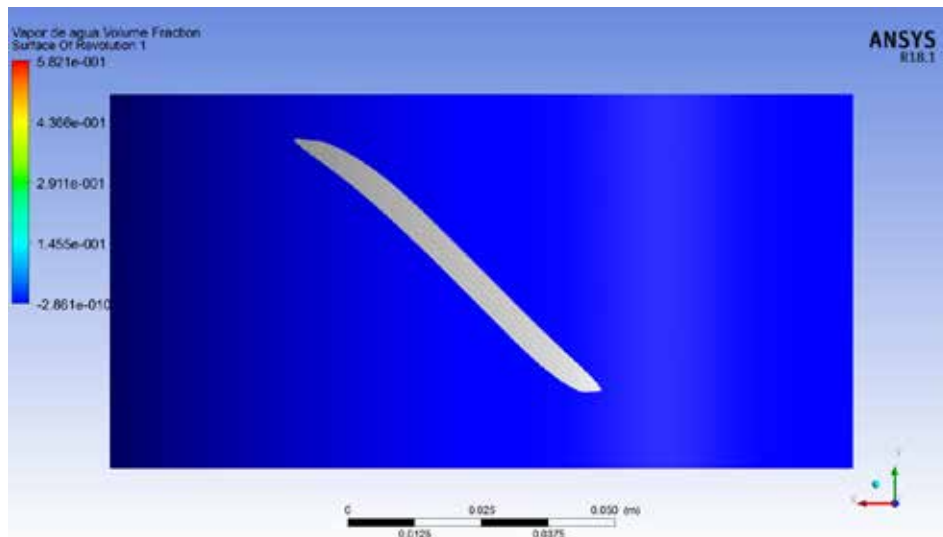
En la Figura 69, se visualiza que la fracción de vapor al principio del álabe (lado izquierdo inferior) es de alrededor de  $3,09\text{E}-2$  %, con una concentración muy puntual de porcentaje de vapor de  $1,238\text{E}-1$ , mientras que al final del álabe (lado derecho), se registran valores que comprenden los  $3,09\text{E}-2$  %, es decir que el riesgo de presentar cavitación es más posible al principio del álabe.



**Figura 69.** Fracción de vapor de agua en álabe orientado a 22.5°

Fuente: Mier y Terán (2019)

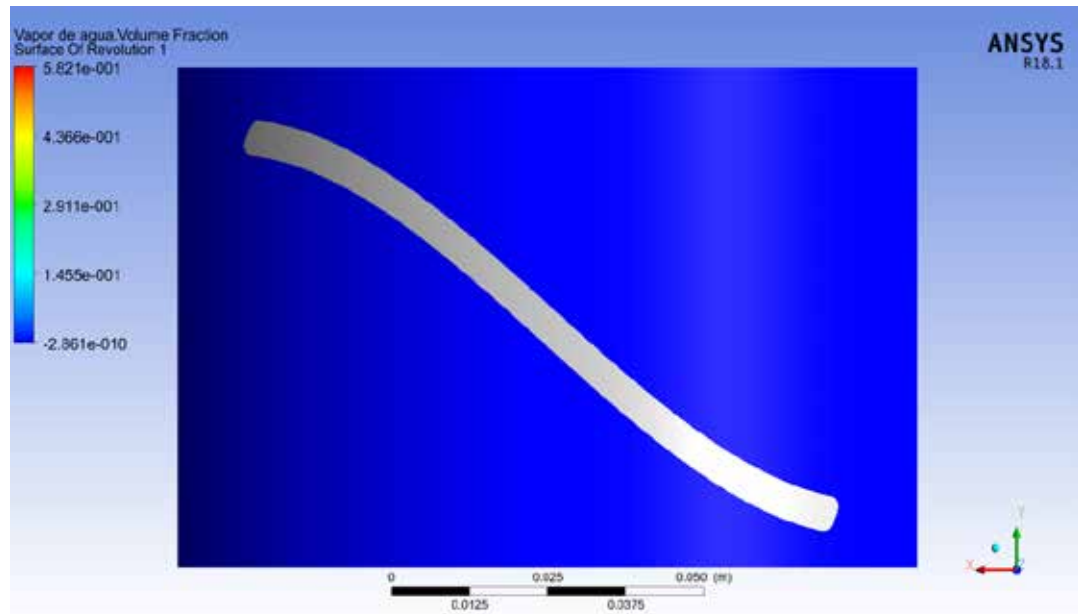
Se puede visualizar en la Figura 70, que no se percibe vapor de agua en todo el plano, es decir que cuando los álabes del rotor están orientados a 30°, la cavitación es prácticamente nula.



**Figura 70.** Fracción de vapor de agua en álabe orientado a 30°

Fuente: Mier y Terán (2019)

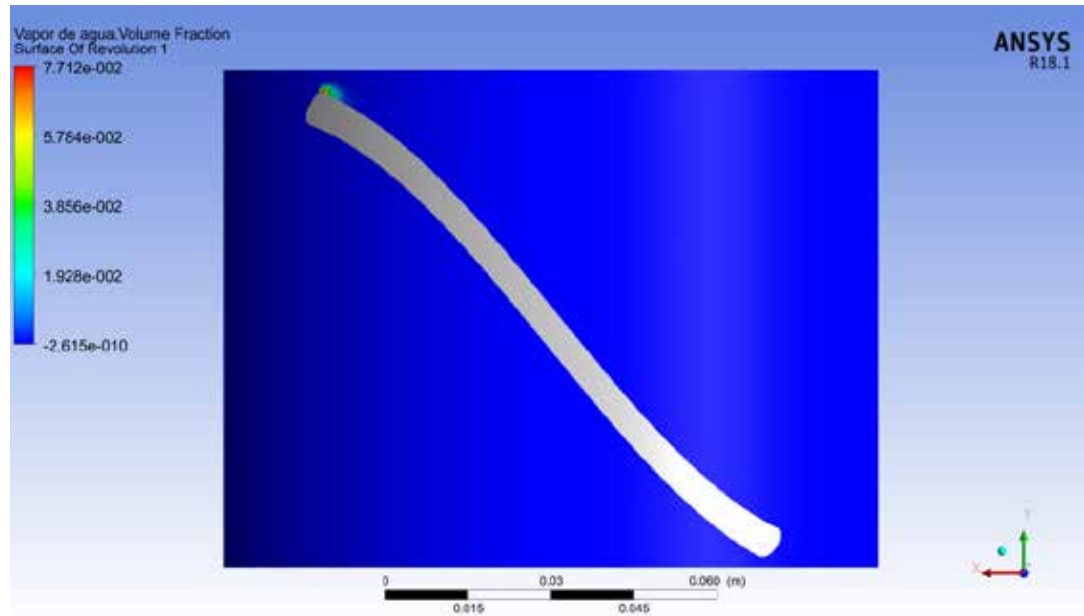
Se observa en la Figura 71, que tampoco registra vapor de agua a lo largo del plano, cuando el álabe se encuentra a los 37,5°, aunque no se descarta que el vapor de agua exista en zonas más alejadas del centro del rotor, como lo demuestra la Figura 73 d).



**Figura 71.** Fracción de vapor de agua en álabe orientado a 37.5°

Fuente: Mier y Terán (2019)

En la Figura 72, se muestra que el álabe a los 45° tiende a formar nuevamente burbujas o vapor de agua, pero esta vez en la parte superior izquierda del álabe, y a su vez no se registra porcentajes de vapor al final de este. Con valores que se comprenden desde 1,928E-2 hasta 7,712E-2 y el cual se promueve la formación de cavitación.



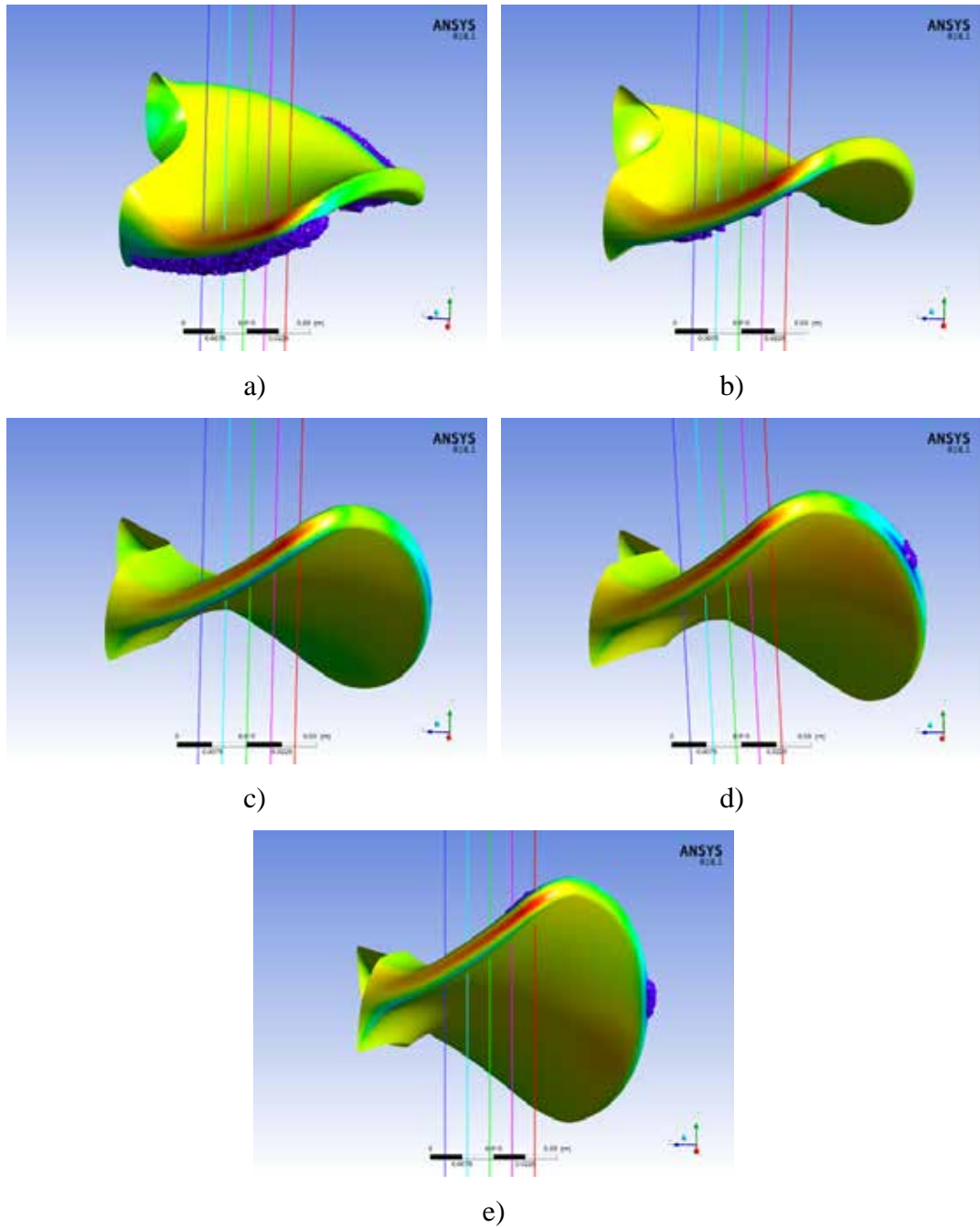
**Figura 72.** Fracción de vapor de agua en álabe orientado a 45°

Fuente: Mier y Terán (2019)

#### 4.4.3.2. Medición de vapor de agua para los álabes orientados a 15°, 22.5°, 30°, 37.5° y 45°

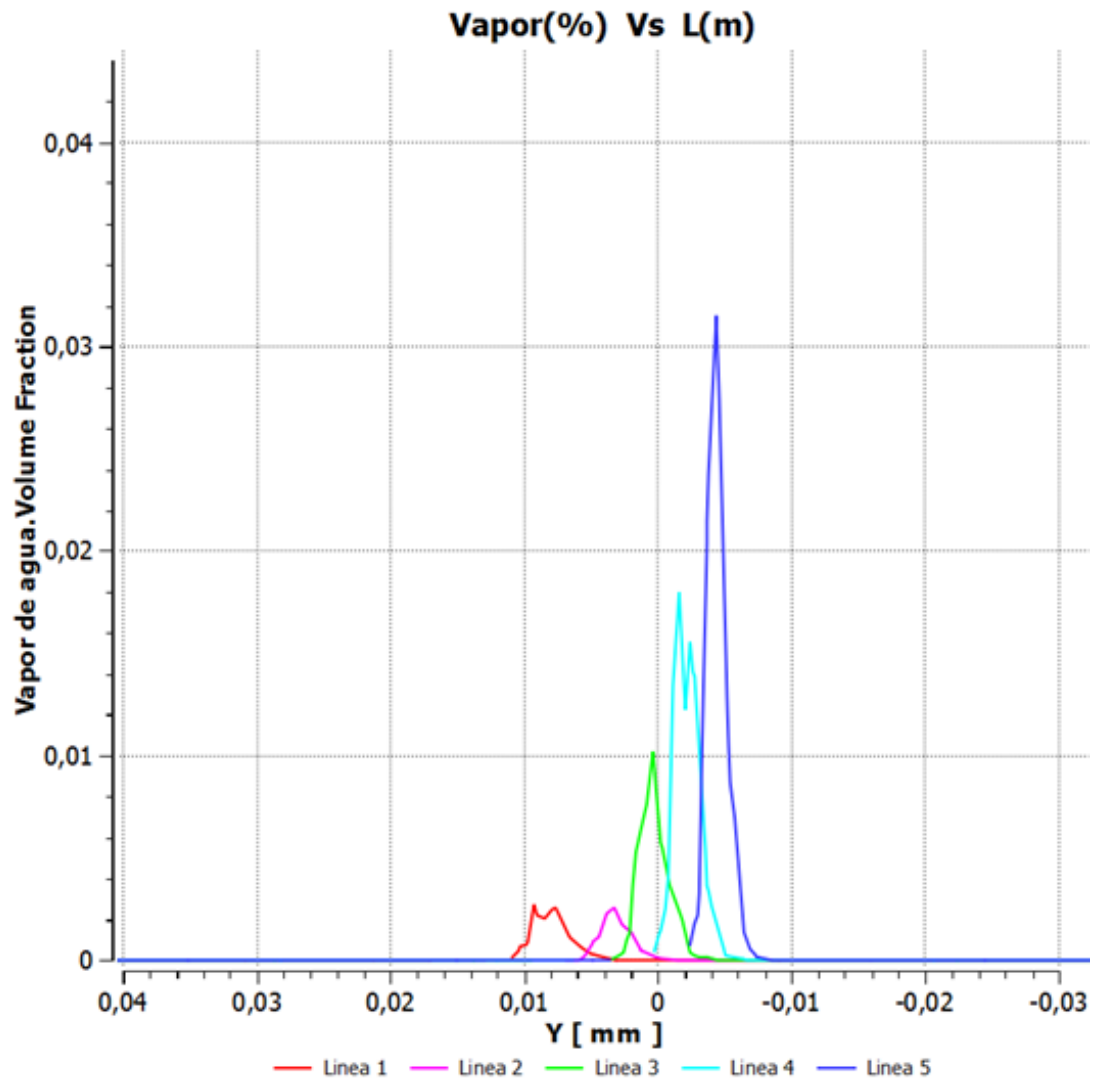
Se trazaron cinco líneas a lo largo del eje Y, con coordenadas semejantes, dentro del dominio fluidizado (ver figura 73) que atraviesan las distintas orientaciones de los álabes, con el fin de graficar las fracciones de vapor de agua a lo largo de la longitud en mm de estas líneas.

En la gráfica 16, se muestra la variación del volumen de vapor en fracciones a lo largo del eje Y. en esta gráfica se denota que la línea 1 (roja) ubicada más al centro del rotor ver figura 86 a), el porcentaje de vapor es de aproximadamente 0,002 % mientras que la línea 5 (azul oscuro), es de más de 0,03%, de modo que aumenta la concentración de burbujas de vapor de agua y por ende de cavitación.



**Figura 73.** Longitudes en eje Y, que atraviesan álabes orientados en a) 15°, b) 22.5°, c) 30°, d) 37.5° y e) 45°

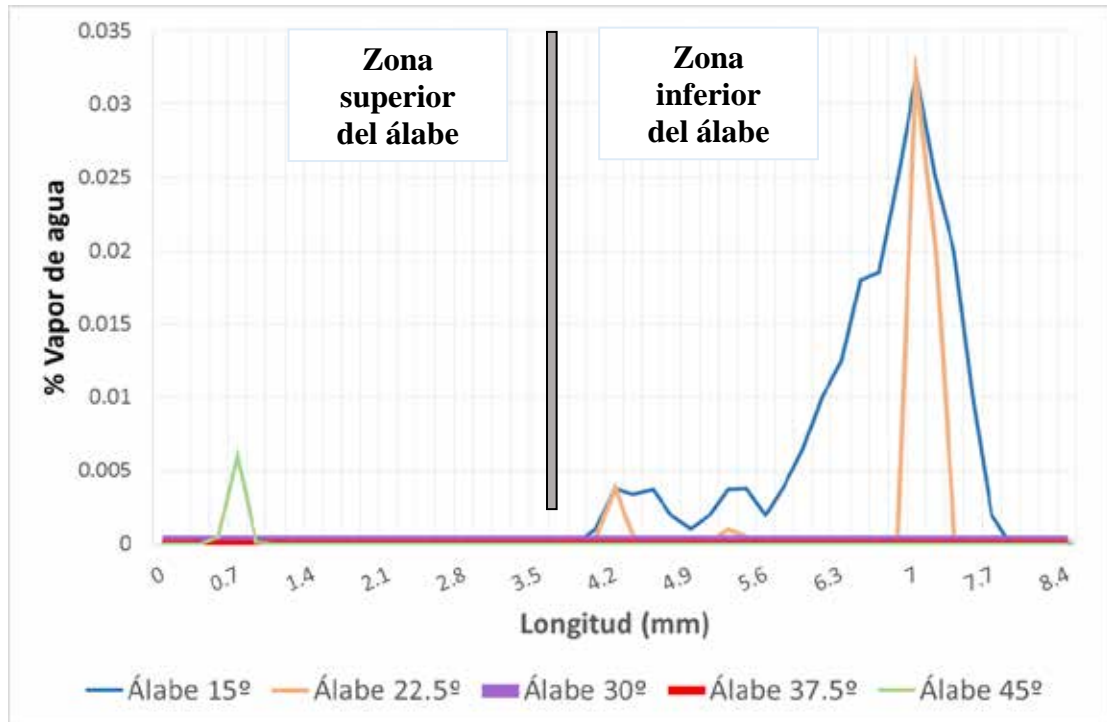
Fuente: Mier y Terán (2019)



**Gráfica 16.** Fracciones de vapor vs longitudes en eje Y que atraviesan el álabe a 15°

Fuente: Mier y Terán (2019)

A continuación, se muestra gráficamente las fracciones de vapor de agua vs longitud. (Ver gráfica 17)



**Gráfica 17.** Vapor de agua (%) vs Longitud (mm) en álabes orientados a 15°, 22.5°, 30°, 37.5° y 45°

Fuente: Mier y Terán (2019)

Se puede visualizar en la gráfica 17, que los álabes orientados a 30° y 37.5° de color morado y rojo respectivamente, no indican vapor de agua al variar la longitud ni en la zona superior ni inferior del álabe, mientras que los álabes orientados a 15° y 22.5° de color azul y amarillo respectivamente, reflejan niveles de vapor en la zona inferior del álabe, al principio en fracciones bajas y al final en fracciones más altas, siendo el de 15° mucho más constante en su trayectoria ascendente, mientras que el de 22.5° baja drásticamente su nivel a mitad de su trayectoria y vuelve a subir hasta llegar a los 0.033%. Por otro lado, el álabe orientado a 45° refleja una baja fracción de vapor solo en la zona superior del álabe, al comiendo de la trayectoria, de alrededor de los 0.007% de Vapor de agua.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se validó la hipótesis de la formación y ubicación de cavitación, sobre la superficie de contacto inicial del fluido con los álabes, por medio de la inclusión del modelo Rayleigh Plesset en el análisis numérico.

De acuerdo a los resultados obtenidos, del campo de flujo en la entrada y la salida del rotor, se determinó, que existen regiones sometidas a los efectos de la cavitación, y que a su vez la orientación de los álabes es fundamental en el surgimiento del fenómeno, ya que, es más favorable para los álabes del rotor, estar orientados entre  $30^\circ$  y  $37.5^\circ$ , debido a que se encontró muy poca presencia de cavitación, mientras que la orientación más crítica y de mayor formación de vapor, es de  $15^\circ$ . Por lo tanto, se sugiere que para minimizar los riesgos de daño por cavitación en el rotor de una turbina Kaplan, los álabes deben estar orientados en  $30^\circ$  la mayor cantidad del tiempo en el que rota, o a grados cercanos a  $30^\circ$  para alargar la vida del rotor, y se debe considerar el uso de materiales más resistentes en esta zona.

La herramienta computacional ANSYS® WorkbenchCFX®, es un software firme, que incluye los modelos matemáticos más avanzados, entre éstos los utilizados en esta investigación para predecir el comportamiento del volumen de vapor, Rayleigh Plesset y el modelo de turbulencia Shear Stress Transport. (SST) en el rotor de la turbina Kaplan, el cual son estudios que son casi imposibles de realizar mediante la matemática convencional. Al realizar simulaciones numéricas de flujos en condiciones de cavitación en el rotor de la turbina Kaplan, utilizando la técnica de aproximación numérica CFD, se obtuvieron resultados que se aproximaron a la realidad.

## **RECOMENDACIONES**

Luego de culminado este trabajo especial de grado, surgen algunas interrogantes que se presentan interesantes de desarrollar en trabajos futuros. Algunas de ellas son las siguientes:

Orientar la mayor parte del tiempo, los álabes de la turbina Kaplan a  $30^\circ$ , para evitar daños severos por cavitación.

Realizar el estudio del fenómeno de cavitación para la turbina Kaplan, con álabes orientados por fuera de los  $15^\circ$  y  $45^\circ$ .

Realizar el estudio del fenómeno de cavitación para la misma turbina, variando la apertura de los álabes directrices, y manteniendo fijo un ángulo de los álabes del rotor.

Realizar el estudio del fenómeno de cavitación para la misma turbina, variando las fracciones de las faces presentes.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANSYS® -CFX. **Release 17 ANSYS® CFX-Solver Theory Guide.** (2016).
- Arias, F. (2012): **El proyecto de investigación**, Caracas: Episteme
- Cengel, Y. (2007): **Fundamentos de Mecanica de Fluidos.** (2ª ed.). Mexico D.F: McGraw Hill Education.
- Dixon, D. L., Hall C.A., (2014): **Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery.** (7<sup>th</sup> Edition). Elsevier, Oxford – UK.
- Hernández, Fernández y Baptista (1998): **Metododologia de la investigación.** México: Mc Graw Hill
- Hurtado I. y Toro G. (2001): **Paradigmas y métodos de investigación en tiempos de cambio.** (4ta ed) Venezuela: Valencia.
- Mataix, C. (1998): **Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas.** (2ª ed.). Madrid: Ediciones del Castillo, S.A.
- Motycak L., Skotak A. y Kupcik R. (2016): **Kaplan turbine tip vortex cavitation - analysis and prevention 26<sup>th</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems.** Beijing, China.
- Nilsson H. y Davidson L. (2015): **A Numerical comparison of Four Operating Conditions in a Kaplan Water Turbine, Focusing on Tip Clearance Flow.** The proceedings of the 20<sup>th</sup> IAHR Symposium, Charlotte, North Carolina, U.S.A.
- Rivetti A., Lucino C., Torres J. y Liscia S. (2013): **Modelación en CFD de una turbina kaplan y comparación con resultados experimentales,** Laboratorio de Hidromecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- Sampieri R., Fernandez C., Baptista P., (2006): **Metodología de la Investigación.** McGraw – Hill.
- Tamayo y Tamayo, Mario. (1997): **El Proceso de la Investigación científica.** Editorial Limusa S.A. México.1997.

Vélez, S. Carlos M (2001): **Apuntes de metodología de la investigación.** Departamento de ciencias básicas Universidad EAFIT, Medellín–Antioquia. [En línea] Disponible en:  
<https://es.slideshare.net/saratogawild/apuntes-metodología-investigación>.

Zorrilla. (1993): **Introducción a la metodología de la investigación.** México: Aguilar.