



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“ANÁLISIS DEL DESGASTE SUPERFICIAL EN LOS ÁLABES DE  
UN RODETE FRANCIS MEDIANTE SIMULACIÓN POR  
ELEMENTOS FINITOS EN LA INTERFAZ DEL MATERIAL  
METALIZADO Y NO METALIZADO: CASO DE ESTUDIO – SAN  
FRANCISCO”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Proyecto de investigación

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTORES: DIEGO FERNANDO MONTENEGRO ANDINO**

**MARCO ALEXANDER CARRILLO PUNINA**

**DIRECTOR: Ing. JORGE ISAÍAS CAICEDO REYES**

Riobamba – Ecuador

2020

© 2020, **Diego Fernando Montenegro Andino y Marco Alexander Carrillo Punina**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Nosotros, Diego Fernando Montenegro Andino y Marco Alexander Carrillo Punina, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 25 de noviembre de 2020



Diego Fernando Montenegro Andino

1802953685



Marco Alexander Carrillo Punina

1804196598

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo: Proyecto de Investigación, “**ANÁLISIS DEL DESGASTE SUPERFICIAL EN LOS ÁLABES DE UN RODETE FRANCIS MEDIANTE SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS EN LA INTERFAZ DEL MATERIAL METALIZADO Y NO METALIZADO: CASO DE ESTUDIO – SAN FRANCISCO**”, realizado por los señores: **DIEGO FERNANDO MONTENEGRO ANDINO Y MARCO ALEXANDER CARRILLO PUNINA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	 Firmado digitalmente por EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ Fecha: 2020.12.22 08:29:13 -0500	2020-11-25
Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes <b>DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	 Firmado digitalmente por JORGE ISAIAS CAICEDO REYES	2020-11-25
Ing. Sócrates Miguel Aquino Reyes <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	 Firmado digitalmente por SOCRATES MIGUEL AQUINO ARROBA	2020-11-25

## **DEDICATORIA**

A mis padres Clopper y Magy por su constante esfuerzo, por la confianza depositada a lo largo de mi trayectoria de formación personal y académica. Por su paciencia, sus consejos y la dedicación que me brindaron en cada una de las etapas que gracias a su apoyo incondicional he logrado superar. A Marco Alexander, mi compañero de equipo con quién fue posible la culminación de esta investigación.

Diego

Dedico este logro a mis padres, Enrique y Mercedes por creer en mí y haber sido parte del camino con su invaluable apoyo, y sobre todo por enseñarme que con esfuerzo y perseverancia voy a lograr todo aquello que Dios me dé la oportunidad de soñar. A Diego por su apoyo y compañía en este largo camino que culmina de carrera universitaria.

Alexander

## AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Virgen de Agua Santa al bendecirme con la oportunidad de realizar mi trabajo de titulación en CELEC EP, permitiendo cumplir uno de los mayores sueños de mi vida. A mi padre que desde el cielo ha sabido guiarme con su presencia y a mi madre al velar por mí en cada momento de este largo y arduo camino de preparación. A cada uno de los integrantes del CIRT por su amistad y la paciencia brindada al compartir su experiencia y conocimientos para la culminación de este trabajo de investigación, especialmente al Ing. Gonzalo Altamirano y al Ing. Marcelo Toapanta por abrirme las puertas a esta maravillosa experiencia. A mis maestros de universidad por la preparación académica impartida en las aulas y las enseñanzas con las que nos formaron como personas de bien. A mi amada y siempre recordada ESPOCH por todo lo vivido en estos años. Agradezco también a todas aquellas personas que de alguna manera supieron brindarme su apoyo durante mi proceso de formación.

Diego

Agradezco a Dios por cada bendición, a mis padres por su guía y paciencia, a mis hermanos Pablo y Diego por su presencia en mi vida, a Kobe por su amor y compañía. A Isabel por cuidar de mí en este camino. Y aquella persona que con su consejo “lograras todo lo que te propongas” dio inicio a mi carrera.

Agradezco también a cada uno de los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con mención especial al Ing. Isaías Caicedo por las oportunidades. A CELEC EP y al CIRT por permitirme haber realizado el proyecto de titulación en sus instalaciones, en especial al Ing. Marcelo Toapanta por compartir sus conocimientos y experiencia. Todos han contribuido a la formación de un buen profesional y mejor persona.

Finalmente agradezco a cada persona que contribuyo de forma directa e indirecta a la culminación de mi carrera universitaria.

Alexander

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xx
SIMBOLOGÍA.....	xxi
LISTA DE ABREVIACIONES.....	xxii
RESUMEN.....	xxiii
SUMMARY.....	xxiv
INTRODUCCIÓN.....	1
1. <b>CAPITULO I: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL</b> .....	2
1.1. <b>Antecedentes</b> .....	2
1.2. <b>Formulación del problema</b> .....	3
1.3. <b>Justificación</b> .....	3
1.4. <b>Alcance</b> .....	4
1.5. <b>Objetivos</b> .....	4
1.5.1. <b>Objetivo General</b> .....	4
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	5
1.6. <b>Central hidroeléctrica</b> .....	5
1.7. <b>Central hidroeléctrica San Francisco</b> .....	5
1.8. <b>Centro de investigación y recuperación de turbinas hidráulicas y partes           industriales</b> .....	6
1.9. <b>Zonas críticas de un rodete Francis</b> .....	6
1.10. <b>Zonas de presión de un rodete Francis</b> .....	7
1.11. <b>Defectos presentes en la superficie de un rodete Francis</b> .....	8
1.12. <b>Cavitación</b> .....	9
1.12.1. <i>Evolución de la cavitación</i> .....	10
1.13. <b>Material compuesto</b> .....	13
1.14. <b>Acero ASTM A743 grado CA-6NM</b> .....	14
1.14.1. <i>Propiedades del acero ASTM A743 grado CA-6NM</i> .....	15

1.14.1.1.	<i>Composición química del acero ASTM A743 grado CA-6NM</i>	15
1.14.1.2.	<i>Propiedades Mecánicas del acero ASTM A743 grado CA-6NM</i>	15
1.15.	<b>Proceso de metalizado en rodetes</b>	16
1.15.1.	<i>Limpieza de la superficie</i>	16
1.15.2.	<i>Normas SSPC</i>	16
1.15.3.	<b>Proceso de granallado</b>	17
1.15.3.1.	<i>Tamaño de grano para granallado</i>	18
1.15.4.	<i>Perfil de anclaje</i>	19
1.15.5.	<b>Recubrimiento metálico</b>	20
1.15.6.	<b>Metalizado por combustión a alta velocidad (HVOF)</b>	21
1.15.6.1.	<i>Componentes y sistemas del proceso HVOF</i>	23
1.15.6.2.	<i>Materiales para un proceso HVOF</i>	24
1.15.7.	<b>Sobre espesor en recubrimientos metálicos</b>	25
1.15.8.	<b>Fallas de adhesión</b>	25
1.15.9.	<b>Contaminación de óxidos e incrustación en recubrimientos</b>	26
1.15.10.	<b>Carburo de tungsteno</b>	26
1.15.10.1.	<i>Proveedores de carburo de tungsteno</i>	28
1.16.	<b>Concentración de sedimentos en el embalse</b>	29
1.17.	<b>Microscopia electrónica de barrido</b>	30
1.17.1.	<i>Microscopio Zeiss EVO MA25</i>	31
1.18.	<b>Paquetes informáticos</b>	33
1.18.1.	<i>Solidworks</i>	33
1.18.2.	<i>Flow Simulation</i>	33
1.19.	<b>Simulación numérica</b>	33
1.19.1.	<i>Simulación por elementos finitos (FEA)</i>	33
1.19.2.	<i>Simulación por dinámica de fluidos computacional (CFD)</i>	33
1.20.	<b>Turbulencia</b>	36
1.20.1.	<i>Modelos de turbulencia</i>	36
1.21.	<b>Mallado</b>	36
1.21.1.	<i>Según su conectividad</i>	37
1.21.1.1.	<i>Malla estructurada</i>	37
1.21.1.2.	<i>Malla no estructurada</i>	37
2.	<b>CAPITULO II: MARCO METODOLÓGICO</b>	39
2.1.	<b>Herramientas de experimentación</b>	39
2.2.	<b>Obtención de la muestra</b>	39
2.2.1.	<i>Selección del álabe objeto de estudio</i>	39
2.2.2.	<i>Obtención de la probeta objeto de estudio</i>	39

2.3.	<b>Análisis de la morfología de la probeta mediante SEM</b> .....	41
2.4.	<b>Obtención de los modelos geométricos de elementos para el análisis</b> .....	46
2.4.1.	<b>Turbina Francis</b> .....	47
2.4.1.1.	<i>Hermeticidad del sistema</i> .....	47
2.4.1.2.	<i>Modelado del caracol</i> .....	49
2.4.1.3.	<i>Modelado del predistribuidor</i> .....	50
2.4.2.	<b>Modelado de la probeta para el análisis</b> .....	54
2.4.2.1.	<i>Modelado de la probeta sin desgaste superficial</i> .....	55
2.4.2.2.	<i>Modelado de la probeta con desgaste superficial</i> .....	60
2.5.	<b>Procedimiento de análisis</b> .....	62
2.5.1.	<b>Configuración de los parámetros de simulación</b> .....	63
2.5.2.	<b>Recursos computacionales</b> .....	63
2.5.3.	<b>Parámetros de operación de la turbina Francis</b> .....	63
2.5.3.1.	<i>Dominio computacional de la turbina Francis</i> .....	64
2.5.3.2.	<i>Generación de la malla sobre la turbina Francis</i> .....	65
2.5.3.3.	<i>Proceso de cálculo</i> .....	66
2.5.3.4.	<i>Generación de planos.</i> .....	66
2.5.4.	<b>Análisis en la zona de ingreso al rodete Francis</b> .....	67
2.5.4.1.	<i>Localización de la probeta en el rodete y sentido del flujo.</i> .....	67
2.5.4.2.	<i>Parámetros de simulación</i> .....	68
2.5.4.3.	<i>Dominio computacional</i> .....	69
2.5.4.4.	<i>Generación de la malla</i> .....	70
2.5.4.5.	<i>Proceso de cálculo</i> .....	70
2.5.4.6.	<i>Generación de planos</i> .....	71
2.5.5.	<b>Análisis en la zona de salida del rodete Francis</b> .....	73
2.5.5.1.	<i>Parámetros de simulación</i> .....	74
2.5.5.2.	<i>Dominio computacional</i> .....	75
2.5.5.3.	<i>Generación de la malla</i> .....	76
2.5.5.4.	<i>Proceso de cálculo.</i> .....	77
2.5.5.5.	<i>Generación de planos</i> .....	77
3.	<b>CAPITULO III: MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b> .....	79
3.1.	<b>Perfil de anclaje y capa de metalizado</b> .....	79
3.2.	<b>Ensamble de la probeta.</b> .....	80
3.2.1.	<i>Probeta sin desgaste superficial</i> .....	80
3.2.2.	<i>Probeta con desgaste superficial en su capa de metalizado y metal base</i> .....	80
3.3.	<b>Comportamiento del fluido en el interior de la turbina.</b> .....	81

3.4.	<b>Comportamiento del fluido en el interior del rodete.</b>	85
3.5.	<b>Comportamiento del fluido en la zona de ingreso al rodete</b>	88
3.5.1.	<b><i>Probeta sin desgaste en la capa de metalizado</i></b>	88
3.5.1.1.	<i>Comportamiento del fluido sobre diferentes espesores de la capa de metalizado....</i>	88
3.5.1.2.	<i>Perfil del fluido en vista perpendicular a su dirección de desplazamiento.</i>	94
3.5.2.	<b><i>Probeta con desgaste en la capa de metalizado y metal base</i></b>	98
3.5.2.1.	<i>Comportamiento del fluido en interacción con el metal base y la zona mixta.</i>	98
3.6.	<b>Comportamiento del fluido en la zona de descarga del rodete.</b>	104
3.6.1.	<b><i>Probeta sin desgaste en la capa de metalizado</i></b>	104
3.6.1.1.	<i>Comportamiento del fluido sobre diferentes espesores de la capa de metalizado..</i>	104
3.6.2.	<b><i>Probeta con desgaste en la capa de metalizado</i></b>	110
3.6.2.1.	<i>Comportamiento del fluido en interacción con el metal base y la zona mixta.</i>	110
3.7.	<b>Puntos críticos detectados en la probeta en diferentes escenarios</b>	116
3.7.1.	<b><i>Zona de ingreso al rodete</i></b>	116
3.7.2.	<b><i>Zona de descarga del rodete</i></b>	117
 <b>CONCLUSIONES</b>		119
 <b>RECOMENDACIONES</b>		121
 GLOSARIO		
 BIBLIOGRAFÍA		
 ANEXOS		

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Características de la turbina Francis de la Central hidroeléctrica San Francisco. ...6
<b>Tabla 1-2:</b>	Características de la denominación del acero CA-6NM.....15
<b>Tabla 1-3:</b>	Composición química ASTM A743 Gr. CA6NM.....15
<b>Tabla 1-4:</b>	Propiedades mecánicas ASTM A743 Gr. CA6NM.....15
<b>Tabla 1-5:</b>	Normas internacionales para preparación de superficies.....16
<b>Tabla 1-6:</b>	Tipos de limpieza según la Norma SSPC.....17
<b>Tabla 1-7:</b>	Tamaño de grano recomendado para preparación de superficies.....18
<b>Tabla 1-8:</b>	Alturas de perfil de anclaje en acero según el tipo de abrasivo utilizado.....19
<b>Tabla 1-9:</b>	Clases comunes de materiales en polvo para recubrimiento.....24
<b>Tabla 1-10:</b>	Propiedades del carburo de tungsteno.....27
<b>Tabla 1-11:</b>	Propiedades del carburo de tungsteno.....28
<b>Tabla 1-12:</b>	Propiedades de WC-CO12.....29
<b>Tabla 2-1:</b>	Recursos de hardware del ordenador.....63
<b>Tabla 2-2:</b>	Parámetros de simulación de la Turbina Francis.....63
<b>Tabla 2-3:</b>	Celdas asignadas y tiempo de resolución del proyecto.....66
<b>Tabla 2-4:</b>	Parámetros del fluido en la zona de ingreso al rodete.....68
<b>Tabla 2-5:</b>	Celdas y tiempo asignado al cálculo de la probeta sin desgaste.....71
<b>Tabla 2-6:</b>	Celdas y tiempo asignado al cálculo de la probeta con desgaste.....71
<b>Tabla 2-7:</b>	Parámetros de simulación para la probeta en la zona de descarga del rodete Francis.....74
<b>Tabla 2-8:</b>	Número de celdas y tiempo asignados al modelo sin desgaste superficial.....77
<b>Tabla 2-9:</b>	Número de celdas y tiempo asignados al modelo con desgaste superficial.....77
<b>Tabla 3-1:</b>	Análisis de la variación del perfil de velocidad sobre diferentes espesores.....90
<b>Tabla 3-2:</b>	Análisis de la variación del perfil de presión sobre diferentes espesores.....91
<b>Tabla 3-3:</b>	Análisis de la variación del perfil de vorticidad sobre diferentes espesores.....92
<b>Tabla 3-4:</b>	Análisis de la variación de la intensidad de turbulencia en diferentes espesores...93
<b>Tabla 3-5:</b>	Análisis de la variación de presión en la probeta con desgaste superficial.....100
<b>Tabla 3-6:</b>	Análisis de variación de velocidad en la probeta con desgaste superficial.....101
<b>Tabla 3-7:</b>	Análisis de los cambios de vorticidad en la probeta con desgaste superficial.....102
<b>Tabla 3-8:</b>	Análisis de los cambios de la intensidad de turbulencia en la probeta con desgaste superficial.....103

<b>Tabla 3-9:</b>	Análisis del perfil de presión en la probeta sin desgaste superficial ubicada en la salida del rodete. ....	106
<b>Tabla 3-10:</b>	Análisis de la variación de velocidad en la zona de salida del rodete sobre la probeta sin desgaste superficial.....	107
<b>Tabla 3-11:</b>	Análisis de la variación de la vorticidad en la probeta sin desgaste superficial ubicada en la salida del rodete. ....	108
<b>Tabla 3-12:</b>	Análisis de la variación de la intensidad de turbulencia sobre la probeta sin desgaste superficial ubicada en la salida del rodete. ....	109
<b>Tabla 3-13:</b>	Análisis de la variación de presión en la probeta con desgaste superficial ubicada en la salida del rodete.....	112
<b>Tabla 3-14:</b>	Análisis de la variación de la velocidad en la probeta con desgaste superficial ubicada en la salida del rodete. ....	113
<b>Tabla 3-15:</b>	Análisis de la variación de la vorticidad en la probeta con desgaste superficial ubicada en la salida del rodete. ....	114
<b>Tabla 3-16:</b>	Análisis de la variación de la intensidad de turbulencia en la probeta con desgaste superficial ubicado en la salida del rodete. ....	115
<b>Tabla 3-17:</b>	Puntos críticos máximos detectados en la probeta sin desgaste superficial. ....	116
<b>Tabla 3-18:</b>	Puntos críticos detectados en la probeta con desgaste superficial. ....	117
<b>Tabla 3-19:</b>	Puntos críticos en la probeta sin desgaste superficial a la salida del rodete .....	117
<b>Tabla 3-20:</b>	Puntos críticos en la probeta con desgaste superficial a la salida del rodete .....	118

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Zonas críticas de desgaste superficial de una turbina tipo Francis.....	7
<b>Figura 1-2:</b>	Zonas de desgaste crítico de una turbina Francis.....	7
<b>Figura 1-3:</b>	Álabes de un rodete Francis que presentan desgaste superficial avanzado. ....	8
<b>Figura 1-4:</b>	Diagrama de presión – temperatura del agua.....	9
<b>Figura 1-5:</b>	Diagrama de fases del agua.....	10
<b>Figura 1-6:</b>	Curva característica de la presión de vapor.....	11
<b>Figura 1-7:</b>	Estrechamiento en el trayecto del fluido.....	11
<b>Figura 1-8:</b>	Formación de burbujas en zonas de sección reducida. ....	12
<b>Figura 1-9:</b>	Implosión de burbujas tras aumentar su presión. ....	12
<b>Figura 1-10:</b>	Desgaste superficial detectada en el rodete de la Unidad 2 de la Central San Francisco. ....	13
<b>Figura 1-11:</b>	Proceso de pasivación en un acero inoxidable. ....	14
<b>Figura 1-12:</b>	Perfil de anclaje o rugosidad. ....	19
<b>Figura 1-13:</b>	Esquema proceso de metalizado. ....	21
<b>Figura 1-14:</b>	Diagrama del proceso de metalizado por HVOF. ....	22
<b>Figura 1-15:</b>	Relación distancia y c/o para adherencia en proceso HVOF. ....	23
<b>Figura 1-16:</b>	Imágenes por microscopía electrónica de barrido a) 0.3 c/o y b) 0.5 c/o.....	23
<b>Figura 1-17:</b>	Aplicación de recubrimiento mediante proceso HVOF con brazo robótico. ....	24
<b>Figura 1-18:</b>	Tipos de perfil de anclaje. ....	26
<b>Figura 1-19:</b>	Influencia del revestimiento en el desarrollo de la eficiencia durante la operación con alta erosión hidro-abrasiva.....	27
<b>Figura 1-20:</b>	Representación esquemática de un microscopio electrónico de barrido.....	31
<b>Figura 1-21:</b>	Microscopio SEM EVO MA 25.....	32
<b>Figura 1-22:</b>	Tipos de mallado a) Estructurada. b) No estructurada. ....	38
<b>Figura 2-1:</b>	Inspección de daños en los álabes del rodete de la unidad 1 de San Francisco. ....	39
<b>Figura 2-2:</b>	Obtención de la probeta principal al cortar el álabe número 4.....	40
<b>Figura 2-3:</b>	Probeta obtenida mediante corte manual para el análisis en SEM.....	40
<b>Figura 2-4:</b>	Probeta sujeta en el porta muestras. ....	41
<b>Figura 2-5:</b>	Cámara CANON EOS Réflex sujeta en torreta de laboratorio de análisis de fallas. ....	42
<b>Figura 2-6:</b>	Imagen importada mediante SmartSEM. ....	42
<b>Figura 2-7:</b>	Introducción de la probeta en el microscopio. ....	43

<b>Figura 2-8:</b>	Posicionamiento de la probeta. ....	43
<b>Figura 2-9:</b>	Proceso de correlación. ....	44
<b>Figura 2-10:</b>	Comprobación de la correlación ....	44
<b>Figura 2-11:</b>	Barrido de la superficie. ....	45
<b>Figura 2-12:</b>	Búsqueda de zonas de interés para análisis.....	45
<b>Figura 2-13:</b>	Posicionamiento de la probeta a una distancia de trabajo de 8,5 mm. ....	46
<b>Figura 2-14:</b>	Imagen obtenida de la interfaz entre la capa de metalizado y el metal base. ....	46
<b>Figura 2-15:</b>	Advertencia del software indicando que no es posible generar un volumen. ....	47
<b>Figura 2-16:</b>	Verificación de hermeticidad sobre el conjunto caracol – pre distribuidor. ....	48
<b>Figura 2-17:</b>	Resultado del proceso de check geometry. ....	48
<b>Figura 2-18:</b>	Cortes transversales para visualización de fallas. a) Anillos del predistribuidor b) Álabes fijos del predistribuidor. ....	49
<b>Figura 2-19:</b>	Cavidades detectadas en las paredes del caracol.....	49
<b>Figura 2-20:</b>	a) Generación de planos concéntricos. b) Croquizado de secciones circulares. c) Generación del sólido por barrido.....	50
<b>Figura 2-21:</b>	Croquizado de álabes fijos del predistribuidor. a) Croquizado del perfil hidráulico de álabes fijos. b) Modelado 3D de álabes fijos.....	50
<b>Figura 2-22:</b>	Croquizado del predistribuidor. a) Croquis de los anillos. b) Generación del anillo por operación de revolución. c) Sólido 3D del predistribuidor. ....	51
<b>Figura 2-23:</b>	Vista superior del conjunto de álabes directrices de la turbina. ....	51
<b>Figura 2-24:</b>	Rodete tipo Francis obtenido mediante proceso de escaneo 3D .....	52
<b>Figura 2-25:</b>	Vista en corte del modelo 3D del caracol y predistribuidor ensamblados. ....	52
<b>Figura 2-26:</b>	Vista isométrica del conjunto de la turbina Francis. ....	53
<b>Figura 2-27:</b>	Vista isométrica en corte de la turbina Francis. ....	53
<b>Figura 2-28:</b>	Dimensiones de la probeta en centímetros.....	54
<b>Figura 2-29:</b>	Perfil de anclaje y dimensiones de la capa de metalizado en el SEM.....	54
<b>Figura 2-30:</b>	Dimensiones de longitud obtenidas en el SEM.....	56
<b>Figura 2-31:</b>	Verificación dimensional de la imagen obtenida en el SEM con la importada a Solidworks. ....	56
<b>Figura 2-32:</b>	Proceso de vectorizado sobre el perfil de anclaje y capa de metalizado de una sección de 1 mm de la probeta. ....	57
<b>Figura 2-33:</b>	Croquis del perfil de anclaje. a) Segmento de 0.71 mm b) Vista ampliada. ....	57
<b>Figura 2-34:</b>	Croquizado del sólido de metal base. a) Vista frontal. b) Vista posterior.....	58
<b>Figura 2-35:</b>	Modelado del metal base mediante operación de recubrimiento. ....	58
<b>Figura 2-36:</b>	Operación de corte - extruir para retirar los excesos de material.....	59
<b>Figura 2-37:</b>	Vista lateral del lado de succión del metal base.....	59
<b>Figura 2-38:</b>	Capa de metalizado del lado de presión.....	60

<b>Figura 2-39:</b>	Vistas isométrica del lado de presión del metal base con desgaste.....	60
<b>Figura 2-40:</b>	Detalles del desgaste superficial sobre el metal base.....	61
<b>Figura 2-41:</b>	Croquis aplicado sobre el metalizado generando apariencia de desgaste .....	61
<b>Figura 2-42:</b>	Selección del dominio computacional con límites que van desde la zona de succión de la turbina hasta la zona de descarga. ....	64
<b>Figura 2-43:</b>	Selección de la cara de ingreso del fluido con un caudal de $58 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	64
<b>Figura 2-44:</b>	Condición de frontera de salida del fluido con una presión estática de 700000 Pa.....	65
<b>Figura 2-45:</b>	Malla de nivel 5 asignada a la geometría de la Turbina Francis. ....	66
<b>Figura 2-46:</b>	Ubicación de la probeta en la zona de ingreso del rodete. ....	67
<b>Figura 2-47:</b>	Dirección del flujo en la entrada del rodete en el sentido de eje Z negativo. ....	68
<b>Figura 2-48:</b>	Dominio computacional probeta sin desgaste. a) Vista isométrica b) Lado de succión c) Vista frontal d) Vista superior e) Vista inferior .....	69
<b>Figura 2-49:</b>	Dominio computacional probeta con desgaste: a) Vista isométrica b) Lado de succión c) Vista frontal d) Vista superior e) Vista inferior .....	69
<b>Figura 2-50:</b>	Mallado aplicado sobre la probeta ubicada al ingreso del rodete. a) Sin desgaste en su capa de metalizado b) Con desgaste sobre la capa de metalizado. ....	70
<b>Figura 2-51:</b>	Selección de puntos con espesores de $115 \mu\text{m}$ , $250 \mu\text{m}$ y $520 \mu\text{m}$ .....	72
<b>Figura 2-52:</b>	Planos de sección generada en diferentes escenarios de la probeta. ....	73
<b>Figura 2-53:</b>	Ubicación de la probeta en la zona de salida del rodete. ....	73
<b>Figura 2-54:</b>	Dirección del flujo a la salida del rodete.....	74
<b>Figura 2-55:</b>	Dominio computacional probeta sin desgaste superficial: a) Vista isométrica b) Lado de presión c) Vista frontal d) Vista superior e) Vista inferior. ....	75
<b>Figura 2-56:</b>	Dominio computacional probeta con desgaste superficial: a) Vista isométrica b) Lado de presión c) Vista frontal d) Vista superior e) Vista inferior. ....	75
<b>Figura 2-57:</b>	Mallado aplicado sobre la probeta ubicada a la salida del rodete. A) Sin desgaste en su capa de metalizado b) Con desgaste sobre la capa de metalizado. ....	76
<b>Figura 2-58:</b>	Selección de puntos con espesores de $115 \mu\text{m}$ , $250 \mu\text{m}$ y $520 \mu\text{m}$ .....	78
<b>Figura 2-59:</b>	Asignación de planos en las zonas de metal base y convergencia con la capa de metalizado. ....	78
<b>Figura 3-1:</b>	Obtención de perfiles en el SEM. a) Capa de metalizado b) Perfil de anclaje.....	79
<b>Figura 3-2:</b>	Obtención de espesor y perfil de la capa de metalizado mediante SEM. a) Perfil del lado de succión b) Perfil del lado de presión.....	79
<b>Figura 3-3:</b>	Probeta sin desgaste superficial. a) Lado de presión b) Lado de succión .....	80
<b>Figura 3-4:</b>	Comparación de las vistas laterales de la probeta real y modelada con desgaste superficial de su capa de metalizado.....	80
<b>Figura 3-5:</b>	Comparación de las vistas superior e inferior de la probeta modelada.....	81

<b>Figura 3-6:</b>	Resultados de simulación del perfil de velocidad en el interior de la turbina. ....	82
<b>Figura 3-7:</b>	Resultado de simulación del perfil de vorticidad al interior de la turbina. ....	82
<b>Figura 3-8:</b>	Resultado de simulación del perfil de turbulencia en el interior de la turbina. ...	83
<b>Figura 3-9:</b>	Resultado de la simulación con el perfil de presión en el interior de la turbina.	83
<b>Figura 3-10:</b>	Resultado de la simulación del perfil de temperatura al interior de la turbina. ...	84
<b>Figura 3-11:</b>	Vista en corte transversal de la turbina, visualizando la trayectoria de la velocidad .....	85
<b>Figura 3-12:</b>	Perfil de presiones y contorno superficial del fluido sobre el rodete Francis. ....	85
<b>Figura 3-13:</b>	a) Zonas de alta presión registrada en el ingreso al rodete. b) Zona de baja presión registrada en el cono del rodete. ....	86
<b>Figura 3-14:</b>	Zona de vorticidad generada en el cono del rodete. ....	87
<b>Figura 3-15:</b>	Vórtices generados por el impacto del fluido con el borde de ataque de la probeta: a) Por velocidad b) Por presión .....	88
<b>Figura 3-16:</b>	Perfil de densidad del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115 $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250 $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520 $\mu\text{m}$ .....	89
<b>Figura 3-17:</b>	Perfil de la temperatura del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115 $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250 $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520 $\mu\text{m}$ . ....	89
<b>Figura 3-18:</b>	Perfil de la velocidad del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115 $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250 $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520 $\mu\text{m}$ . ....	90
<b>Figura 3-19:</b>	Perfil de la presión del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115 $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250 $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520 $\mu\text{m}$ . ....	91
<b>Figura 3-20:</b>	Perfil de vorticidad del fluido en el lado de succión sobre a) Un espesor de 115 $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250 $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520 $\mu\text{m}$ . ....	92
<b>Figura 3-21:</b>	Perfil de intensidad de turbulencia del fluido en el lado de succión sobre a) Un espesor de 115 $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250 $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520 $\mu\text{m}$ . ....	93
<b>Figura 3-22:</b>	Perfil de temperatura del fluido sobre una variación de espesor en la capa de metalizado. ....	94
<b>Figura 3-23:</b>	Perfil de la densidad del fluido sobre un sector de espesor variable en la capa de metalizado. ....	94
<b>Figura 3-24:</b>	Perfil de velocidad del fluido sobre un sector de espesor variable en la capa de metalizado. ....	95
<b>Figura 3-25:</b>	Perfil de la intensidad de turbulencia del fluido sobre un sector de espesor variable en la capa de metalizado. ....	95
<b>Figura 3-26:</b>	Perfil de la vorticidad del fluido sobre un sector de espesor variable en la capa de metalizado. ....	96
<b>Figura 3-27:</b>	Perfil de la presión del fluido sobre un sector de espesor variable en la capa de metalizado. ....	96

<b>Figura 3-28:</b>	Comportamiento del fluido visto a lo largo del corte perpendicular a la dirección del flujo. a) Velocidad. b) Vorticidad) c) Intensidad de turbulencia. .97
<b>Figura 3-29:</b>	Zonas de análisis en la probeta con desgaste superficial. a) Metal base b) Zona de convergencia entre el metal base y la capa de metalizado. ....98
<b>Figura 3-30:</b>	Perfil de densidad del fluido en diferentes zonas de la probeta. a) Metal base. b) Zona de convergencia.....98
<b>Figura 3-31:</b>	Perfil de temperatura del fluido en diferentes zonas de la probeta. a) Metal base. b) Zona de convergencia. ....99
<b>Figura 3-32:</b>	Perfil de presión del fluido en diferentes zonas de la probeta. a) Metal base. b) Zona de convergencia. ....99
<b>Figura 3-33:</b>	Perfil de velocidad del fluido en diferentes zonas de la probeta. a) Metal base. b) Zona de convergencia. ....100
<b>Figura 3-34:</b>	Perfil de vorticidad del fluido en diferentes zonas de la probeta. a) Metal base. b) Zona de convergencia. ....101
<b>Figura 3-35:</b>	Perfil de intensidad de turbulencia del fluido en diferentes zonas de la probeta. a) Metal base. b) Zona de convergencia. ....102
<b>Figura 3-36:</b>	Trayectoria del fluido en la zona de descarga. ....104
<b>Figura 3-37:</b>	Perfil de densidad del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115 $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250 $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520 $\mu\text{m}$ . ....104
<b>Figura 3-38:</b>	Perfil de temperatura del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115 $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250 $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520 $\mu\text{m}$ . ....105
<b>Figura 3-39:</b>	Perfil de presión del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115 $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250 $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520 $\mu\text{m}$ . ....105
<b>Figura 3-40:</b>	Perfil de velocidad del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115 $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250 $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520 $\mu\text{m}$ . ....106
<b>Figura 3-41:</b>	Perfil de vorticidad del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115 $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250 $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520 $\mu\text{m}$ . ....107
<b>Figura 3-42:</b>	Perfil de intensidad de turbulencia del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115 $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250 $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520 $\mu\text{m}$ . .....108
<b>Figura 3-43:</b>	Zonas de análisis en la probeta con desgaste superficial a la salida del rodete. a) Metal base b) Zona de convergencia entre metal base y capa de metalizado. .110
<b>Figura 3-44:</b>	Perfil de densidad del fluido. a) Metal base. b) Zona de convergencia metal base con la capa de metalizado. ....110
<b>Figura 3-45:</b>	Perfil de temperatura del fluido. a) Metal base. b) Zona de convergencia metal base con la capa de metalizado. ....111
<b>Figura 3-46:</b>	Perfil de presión del fluido. a) Metal base. b) Zona de convergencia metal base con la capa de metalizado. ....111

<b>Figura 3-47:</b>	Perfil de velocidad del fluido. a) Metal base. b) Zona de convergencia metal base con la capa de metalizado. ....	112
<b>Figura 3-48:</b>	Perfil de vorticidad del fluido. a) Metal base. b) Zona de convergencia metal base con la capa de metalizado. ....	113
<b>Figura 3-49:</b>	Perfil de intensidad de turbulencia del fluido. a) Metal base. b) Zona de convergencia metal base con la capa de metalizado. ....	115

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-1:</b>	Procedimiento para realizar una simulación correcta.....	35
<b>Gráfico 2-1:</b>	Procedimiento planteado para el análisis. ....	62

## ÍNDICE DE ANEXOS

**ANEXO A** INFORMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA EN ECUADOR

**ANEXO B** PRODUCCIÓN HIDROELÉCTRICA EN EL ECUADOR

**ANEXO C** PLANO DEL RODETE FRANCIS

**ANEXO D** PLANO DEL CARACOL DE LA TURBINA FRANCIS

**ANEXO E** PLANO DEL ÁLABE DIRECTRIZ DE LA TURBINA FRANCIS

## **SIMBOLOGÍA**

<b>MIL</b>	Milésima de una pulgada
<b>μ</b>	Micra
<b>Dp</b>	Distancia entre la boquilla de proyección y la superficie del sustrato
<b>Pv</b>	Presión de vaporización
<b>Tr</b>	Punto triple del agua
<b>[Pa]</b>	Pascal
<b>[m/s]</b>	Metros sobre segundo
<b>Hz</b>	Hertz
<b>°C</b>	Grado centígrado

## LISTA DE ABREVIACIONES

ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
ASTM	Asociación Americana de Ensayo de Materiales
CAD	Diseño Asistido por computadora
CELEC EP	Corporación Eléctrica del Ecuador – Empresa Pública
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional
CIRT	Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales
DES	Simulación de Torbellinos Desprendidos
DNS	Simulación Numérica Directa
FEA	Análisis de Elementos Finitos
ISO	Organización Internacional de Normalización
LES	Simulación de Grandes Remolinos
MA	Material Analyze
NACE	Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión
RANS	Reynolds Promedio de las ecuaciones de Navier Stokes
SPPC	Consejo de Pintura en Estructuras de Acero
MEB	Microscopio Electrónico de Barrido
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>

## RESUMEN

La falta de información referente al desgaste superficial a nivel micrométrico en los álabes de un rodete Francis motivó a realizar el análisis de desgaste superficial en los álabes del rodete Francis de la Central Hidroeléctrica San Francisco, mediante simulación por elementos finitos en la interfaz del material metalizado y no metalizado. El proyecto inició con la extracción de una sección de álabe que permitió realizar un estudio detallado de su morfología a nivel micrométrico. Con ayuda del microscopio electrónico de barrido del CIRT, se logró obtener la morfología del perfil de anclaje del metal base, capa de metalizado y perfil externo. Se utilizó el software Solidworks para realizar el modelado 3D de la sección de álabe extraído incluyendo los detalles de su morfología. Mediante simulación CFD con la herramienta Flow Simulation se generaron 3 diferentes escenarios de estudio: el conjunto de la turbina Francis, que permitió observar el comportamiento del fluido a escala macro dentro del rodete, un modelo 3D sin desgaste superficial y un modelo 3D con desgaste superficial en la capa de metalizado. Con la simulación se encontró que las propiedades del fluido cambian en sus valores numéricos cuando existen cambios bruscos de sección, ya sea por erosión del material debido a cavitación previa o por zonas de la capa de metalizado con sobre espesor. Los deltas de variación en los valores de la densidad y temperatura del fluido fueron mínimos, razón por la cual se consideraron despreciables asumiendo que estas propiedades son constantes a lo largo de su trayectoria en el interior de la turbina. Se recomienda trabajar con un espesor estándar de 250  $\mu\text{m}$  para procedimientos de metalizado en rodetes, dado que zonas con mayor espesor se convierten en concentradores de esfuerzos generando condiciones de cavitación que afectan los álabes del rodete.

Palabras clave: <METALIZADO> <DESGASTE SUPERFICIAL> <MORFOLOGÍA> <PERFIL DE ANCLAJE> <RODETE FRANCIS> <DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS> <SIMULACIÓN DE FLUIDOS> <MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO> <CAVITACIÓN> <ESCANEÓ 3D>



16-12-2020

0504-DBRAI-UPT-2020

## SUMMARY

The lack of information regarding surface wear at the micrometric level on the blades of a Francis runner led to the analysis of surface wear on the blades of the Francis runner at the San Francisco Hydroelectric Power Plant, through finite element simulation at the interface of the metallized material and not metallic. The project began with the extraction of a blade section that allowed a detailed study of its morphology at a micrometric level. With the help of the CIRT scanning electron microscope, it was possible to obtain the morphology of the anchoring profile of the base metal, metallization layer and external profile. Solidworks software was used to perform 3D modeling of the extracted blade section including details of its morphology. By means of CFD simulation with the Flow Simulation tool, 3 different study scenarios were generated: the Francis turbine assembly, which allowed observing the behavior of the fluid on a macro scale inside the impeller, a 3D model without surface wear and a 3D model with surface wear in the metallized layer. With the simulation it was found that the fluid properties change in their numerical values when there are sudden changes in section, either by erosion of the material due to previous cavitation or by areas of the metallized layer with excess thickness. The deltas of variation in the values of the density and temperature of the fluid were minimal, that is the reason why they were considered negligible assuming that these properties are constant throughout their trajectory inside the turbine. It is recommended to work with a standard thickness of 250  $\mu\text{m}$  for impeller metallization procedures, since areas with greater thickness become stress concentrators, generating cavitation conditions that affect the impeller blades.

Keywords: <METALLIZED> <SURFACE WEAR> <MORPHOLOGY> <ANCHOR PROFILE> <FRANCIS IMPELLER> <COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS> <FLUID SIMULATION> <3D SCANNING ELECTRONIC MICROSCOPE> <CAVITATION> <3D SCANNING

## INTRODUCCIÓN

La presente propuesta de investigación tiene como objetivo principal la realización de una simulación mediante elementos finitos, para experimentalmente determinar las causas que provocan el desgaste presente en los álabes de una turbina Francis, elemento hidráulico fundamental para la generación de energía eléctrica en la Central Hidroeléctrica San Francisco.

Para lograr este objetivo se establecerán parámetros de operación reales a los cuales está sometida la turbina que permitan realizar un correcto proceso de simulación.

La investigación realizada supondrá obtener información de interés para conocer las causas que llevan a los elementos hidráulicos a desgastarse con mayor rapidez, también servirá para presentar alternativas de solución para brindarles mayor tiempo de vida útil tras la reparación.

Para el desarrollo de este trabajo se realizarán observaciones con el microscopio electrónico de barrido, con el fin de obtener información suficiente y adecuada que permita orientar el estudio con la morfología propia de la capa de metalizado y metal base del elemento.

Posteriormente, se trasladará la información obtenida en el SEM al software *Solidworks* para realizar el modelado de la turbina tipo Francis, así como el modelo 3D de la probeta extraída de uno de los álabes del rodete, de manera que se pueda tener un escenario virtual de operación con el cual llevar a cabo las simulaciones sobre el sistema de la turbina desde un punto de vista macrométrico, así como de la probeta ubicada en la zona de ingreso y descarga del rodete con un análisis micrométrico, determinando los fenómenos hidráulicos que ocurren en su entorno y las causas posibles que llevan al desgaste de los álabes.

## 1. CAPITULO I: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 1.1. Antecedentes

La matriz energética ecuatoriana basa su producción en sus centrales hidroeléctricas y la operación óptima de sus unidades generadoras, puesto que en ellas se inicia el proceso de producción de energía limpia y sustentable. La mayor parte de este proceso ocurre en la turbina, específicamente en el rodete, elemento encargado de absorber el impacto directo del fluido para posteriormente realizar el intercambio energético con el generador.

Para esta investigación centramos como objetivo la Central San Francisco, hidroeléctrica que opera 24 horas al día mediante dos unidades tipo Francis con potencia nominal de 115 MW cada una, generando un total de 230 MW (CELEC EP, 2019). Debido al funcionamiento continuo de la turbina y el contacto permanente de sus elementos hidráulicos con el agua, estos se exponen a un desgaste agresivo, especialmente su rodete (Lazo, 2015, pág. 15).

Adicional a ello un rodete Francis es vulnerable al desgaste superficial debido a la configuración de su geometría, puesto que, en su interior tienden a generarse gradientes de presión y velocidad que sumados a las partículas en suspensión que contiene el agua en conjunto vienen a ser condiciones óptimas que generan múltiples fenómenos hidráulicos inherentes<sup>1</sup> que acortan su vida útil.

Al realizar el primer overhaul<sup>2</sup> de la central hidroeléctrica San Francisco se extrajo el rodete de la unidad 2 con 44124 horas de funcionamiento, mismo que presentaba un desgaste agresivo sobre la mayor parte de su superficie (Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 5).

Existen trabajos previos a esta investigación que ofrecen información válida sobre los efectos de desgaste superficial sobre los álabes de un rodete y demás partes hidráulicas de una turbina. A nivel nacional (Macas Díaz , 2017) y (Urvina Pérez, Estudio y Simulación Numérica de los Efectos de Flujo Cavitativo en Turbinas Tipo Francis de la Central Hidroeléctrica "Agoyan", 2016), de igual manera realiza un estudio de simulación numérica de los efectos del flujo sobre la turbina Francis de Hidroagoyán. Sin embargo, el enfoque de estos estudios es de nivel macrométrico asumiendo una superficie uniforme de los elementos en estudio.

---

<sup>1</sup> Fenómenos hidráulicos propios de la turbina que siempre se encuentran presentes en su interior y se producen por el contacto del fluido con la geometría de cada uno de sus elementos.

<sup>2</sup> Tiene por objetivo desmontar los elementos internos de la turbina para realizar tareas de mantenimiento preventivo y correctivo que permitan visualizar la posible existencia de fallos en las partes hidráulicas de la turbina que hagan necesaria su reparación integral o reemplazo.

## **1.2. Formulación del problema**

Debido a la geometría de un rodete Francis se generan gradientes de presión y velocidad al interior de sus álabes, escenario ideal para que, con ayuda del fluido como agente erosivo, se formen fenómenos hidráulicos en su superficie. Estos fenómenos atacan ciertas zonas del rodete provocando el desprendimiento de la capa de metalizado superficial de 250  $\mu\text{m}$  de espesor, cuya función es otorgarle una mayor resistencia ante los impactos directos del fluido y las partículas en suspensión que este transporta. Gracias a los avances de la ciencia de materiales se han desarrollado los conocidos “recubrimientos duros” cuya aplicación principal es el aumentar la vida útil de los elementos hidráulicos para de esta manera optimizar su producción. Aun así, esta capa metalizada tiende a desprenderse de la superficie (Caballero, Aperador, & Delgado, 2014, pág. 164).

Años atrás el Ecuador no contaba con un centro dedicado al estudio de los fenómenos hidráulicos que afectan a los elementos de las turbinas de las hidroeléctricas del país, sin embargo en la actualidad el CIRT como eje fundamental de la reparación de turbinas, en base a la experiencia adquirida y la información de investigación recopilada de procesos de reparación, ve la necesidad de realizar un estudio de nivel micrométrico del comportamiento del fluido sobre la superficie del álabe de rodete que aclare de mejor manera la relación existente entre el comportamiento del fluido, el espesor de la capa de metalizado y el metal base.

## **1.3. Justificación**

Uno de los sectores estratégicos más importantes del Ecuador es la generación hidroeléctrica con un aporte de 20843 MWh al sistema nacional interconectado, donde la Unidad de Negocio Hidroagoyán aporta 1668 MWh, generación de vital importancia para el desarrollo tecnológico e industrial del Ecuador.

El éxito de este sector está ligado con el correcto funcionamiento de las unidades generadoras de sus centrales, por lo cual es fundamental mantener operativos los elementos y sistemas hidráulicos que conforman las turbinas. Una unidad que debe frenar su producción debido a problemas de erosión generados sobre su rodete antes de llegar a su tiempo estimado de reparación tiene como consecuencia altas pérdidas económicas debido a los costos de mantenimiento y paralización que esto implica.

Se puede paralizar una unidad generadora debido a bajas de rendimiento del sistema por fallas o rupturas de sus elementos internos. Al no contar con información precisa sobre los problemas que causa el desprendimiento brusco de la capa de metalizado de los álabes de un rodete Francis, este proyecto pretende documentar resultados validados mediante simulación CFD y análisis

microscópico de barrido en probetas con metalizado superficial con daños por erosión, para que sean un aporte que otorgue alternativas efectivas que mejoren a futuro el proceso de aplicación de carburo de tungsteno brindando una mejor protección a los álabes del rodete, otorgándole así una mayor vida útil con ciclos más largos de funcionamiento.

El CIRT junto a su infraestructura y equipo tecnológico, permite realizar el estudio de los fenómenos hidráulicos en una turbina de una manera técnica, logrando generar simulaciones CFD de carácter microscópico que permitan analizar y comprender de mejor manera el comportamiento del fluido cuando este interactúa con la morfología superficial de elementos hidráulicos, en este caso los álabes del rodete que son las partes más afectadas del sistema.

Esta investigación permitirá al CIRT contar con información documentada que se puede utilizar de respaldo en el estudio de futuros trabajos relacionados con el mejoramiento del procedimiento interno de aplicación de la capa de metalizado.

#### **1.4. Alcance**

Este trabajo centra su objetivo en proveer información precisa sobre el comportamiento del fluido como causa del desgaste en la zona de convergencia de la superficie metalizada y no metalizada del álabe de un rodete Francis mediante simulación por Dinámica de Fluidos Computacional.

Para ello se obtuvo información de la morfología de una sección del álabe número 4 del rodete Francis de la Central San Francisco extraído con corte manual, sobre el cual se realizaron observaciones en el SEM que permitan generar un modelo 3D de la probeta obtenida incluyendo detalles superficiales de su capa de metalizado y metal base.

Para el proceso de ensamble de la turbina en Solidworks se utilizaron los sólidos de sus elementos previamente escaneados por el CIRT, realizando correcciones sobre elementos que presentaran fallas de construcción y modelando aquellos elementos con los que no se contaba, para lo cual se utilizaron los planos de la turbina facilitados por Hidroagoyán.

Finalmente, para la simulación se utilizó el paquete *Flow Simulation*, con el que se establecieron escenarios adecuados de operación, simulación y obtención de resultados gráficos.

#### **1.5. Objetivos**

##### ***1.5.1. Objetivo General***

Analizar el desgaste superficial en los álabes de un rodete Francis mediante simulación por elementos finitos en la interfaz del material metalizado y no metalizado.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Adquirir información necesaria referente al funcionamiento del sistema de la turbina Francis de la central hidroeléctrica San Francisco.
- Obtener el modelo de la micro morfología presente en una sección del álabe del rodete Francis que se encuentre en condiciones normales, sin desgaste de su capa de metalizado utilizando el SEM.
- Obtener el modelo de la micro morfología presente en una sección del álabe del rodete Francis que se encuentre en condiciones de desgaste superficial de su capa de metalizado utilizando el SEM.
- Realizar la simulación CFD de la turbina trabajando a condiciones normales para obtener información de los fenómenos internos que el fluido produce al interactuar con el rodete.
- Realizar la simulación CFD sobre la geometría de la sección del álabe en condiciones normales sin desgaste.
- Realizar la simulación CFD sobre la geometría de la sección del álabe que presente condiciones de desgaste sobre su capa de metalizado.

### **1.6. Central hidroeléctrica**

Una central hidroeléctrica tiene como característica principal el aprovechar la energía potencial de su embalse, que al ser transportada mediante una tubería hacia la casa de máquinas de la central adquiere energía cinética capaz de dotar de rotación al rodete de la turbina, mismo que a la par provoca el giro del rotor al que se encuentra acoplado generando energía eléctrica.

### **1.7. Central hidroeléctrica San Francisco**

La central hidroeléctrica San Francisco posee un caudal de  $116 \text{ m}^3/\text{s}$  con una caída neta de 200 m. Posee dos turbinas tipo Francis con una producción de 115 MW cada una generando un total de 230 MW con rendimiento óptimo en márgenes de operación comprendidos entre el 60 y 100% del caudal máximo. Para que estos márgenes se mantengan es necesario que la central emplee dos unidades generadoras de modo que ninguna de ellas trabaje individualmente por debajo de estos valores de operación.

**Tabla 1-1:** Características de la turbina Francis de la Central hidroeléctrica San Francisco.

Tipo	Francis simple
Cantidad	2
Diámetro del rodete a la salida	3030 mm
Número de álabes del rodete	13 álabes fijos
Número de álabes directrices	20 álabes directrices
Rotación	327,27 RPM sentido horario
Rotación de disparo	548 RPM
Potencia nominal	115 MW/unidad
Sentido de giro	Horario (visto desde arriba)
Densidad del agua	0,99985 g /cm <sup>3</sup>
Aceleración de la gravedad	9,777 m/s <sup>2</sup>
Temperatura del agua	16 °C

Fuente: (CELEC EP, 2019)

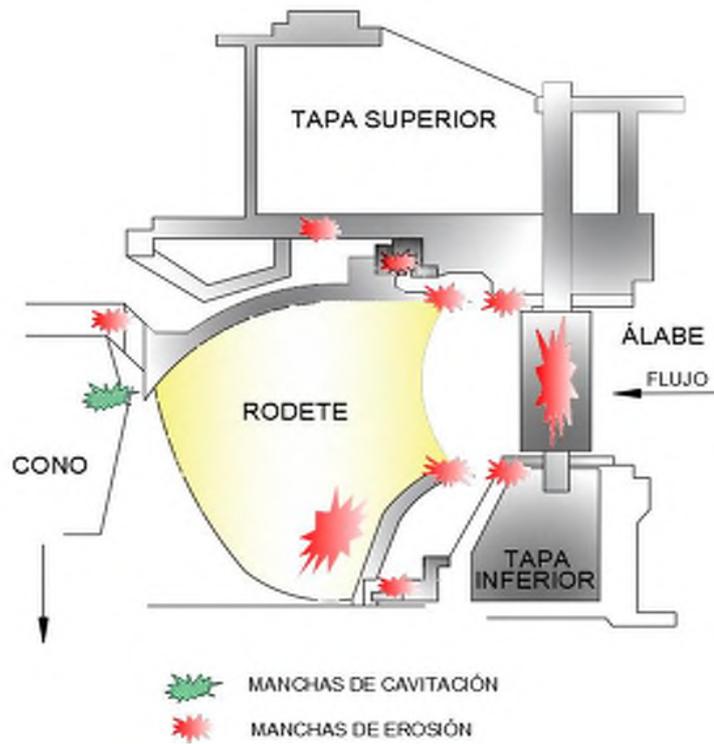
**Realizado por:** Autores

### **1.8. Centro de investigación y recuperación de turbinas hidráulicas y partes industriales**

El CIRT como parte fundamental de la Unidad de Negocio Hidroagoyán, cuenta con mano de obra nacional cualificada y tecnología de punta necesaria que permite impulsar la investigación y reparación en tiempos relativamente cortos de partes industriales provenientes de las diferentes unidades de negocio pertenecientes a CELEC EP. Esto genera un ahorro económico aproximado de \$12 500 000. Además, se encuentra capacitado para realizar diferentes tipos de procesos de reparación, especialmente aquellos que requieran de procedimientos de control de calidad e ingeniería. Cabe destacar que con investigación continua se ha convertido en un eje fundamental en la optimización de los parámetros de producción, aplicando criterios técnicos e impulsando investigación que permita documentar el comportamiento de los elementos hidráulicos que ven comprometida su vida útil debido a los efectos del desgaste superficial.

### **1.9. Zonas críticas de un rodete Francis**

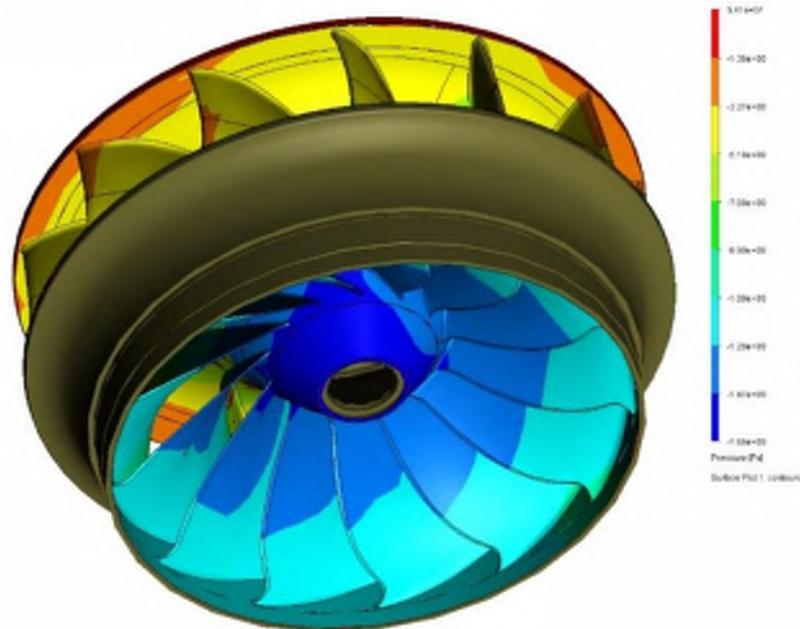
Las zonas que se encuentran sujetas a un mayor desgaste erosivo superficial son aquellas en las que el paso del agua es más restringido y por ende su velocidad es más alta. En la Figura 1-1 se identifica estas zonas, diferenciándolas si el daño producido es erosión o cavitación.



**Figura 1-1:** Zonas críticas de desgaste superficial de una turbina tipo Francis.

Realizado por: Autores

### 1.10. Zonas de presión de un rodete Francis



**Figura 1-2:** Zonas de desgaste crítico de una turbina Francis.

Realizado por: (Toapanta, 2018, pág. 185)

En las partes donde la presión es más alta el rodete va a soportar mayores esfuerzos. Comparando la Figura 1-2 con un rodete en físico que está desgastado, se ve claramente que los daños se dan en la parte por donde ingresa el fluido (Mora Sánchez, 2018, pág. 50), dichas zonas son propensas a ser dañadas por erosión, ya que es donde ocurren las presiones más altas, sin embargo, luego que el fluido viaja aguas abajo la presión cae repentinamente, produciéndose el fenómeno de cavitación, siendo la zona de mayor caída de presión el lado de succión de los álabes incluyendo toda la salida del rodete (Zegarra, 2015, pág. 77).

### 1.11. Defectos presentes en la superficie de un rodete Francis

El tiempo de uso útil que pueden tener los elementos hidráulicos empleados para la generación de energía eléctrica a través de turbinas, están condicionados por diversos factores, que pueden provocar un mayor desgaste de las piezas. Dichos factores pueden ser:

- Diseño y construcción.
- Instalación y montaje.
- Condiciones de operación conforme a recomendaciones del fabricante.
- Mantenimiento bajo recomendaciones del fabricante.
- Materiales y suministros utilizados en la operación y mantenimiento.
- Calidad de agua turbinada.



**Figura 1-3:** Álabes de un rodete Francis que presentan desgaste superficial avanzado.<sup>3</sup>

**Realizado por:** Autores

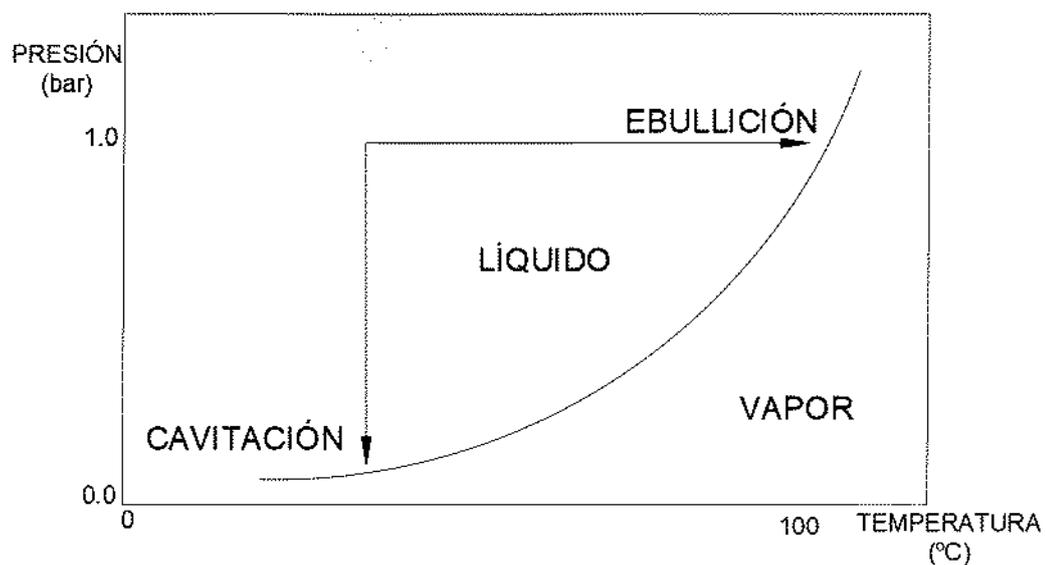
---

<sup>3</sup> Se observa que el desgaste superficial en la zona de succión del rodete es de carácter agresivo debido al cambio de presión repentino del agua.

Existen diferentes fenómenos que provocan defectos importantes en la superficie de rodetes. Entre ellos se encuentra: cavitación misma que se genera por la formación de burbujas de agua y su consecuente implosión; erosión se origina debido a la presencia de partículas sólidas en el agua; abrasión produce un desgaste de la superficie por la interacción de partículas sólidas, y fatiga como consecuencia de la aparición de sobre esfuerzos. En la Figura 1-3, se puede evidenciar algunos defectos que sufre un rodetes.

### 1.12. Cavitación

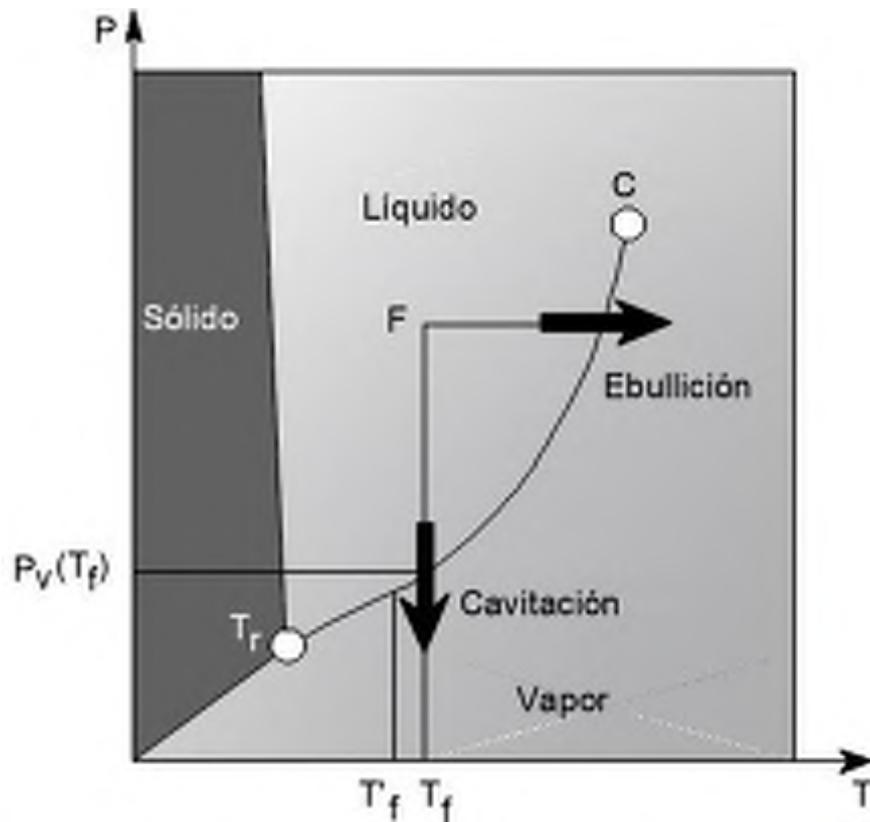
El fenómeno de cavitación es un problema muy común que se sucede en elementos hidráulicos, se originan debido al descenso repentino de la presión hidrodinámica que junto con la temperatura constante en los interiores de un rodetes provocan la formación de cavidades de fluido en forma de burbujas, mismas que siguen el recorrido del fluido hacia zonas de alta presión en donde chocan contra las superficies sólidas del material, dando lugar a una implosión a altas velocidades provocando con ello el desgaste del material y como consecuencia disminuyendo el rendimiento óptimo del sistema. La Figura 1-4, presenta la relación entre presión y temperatura de manera que se puede seguir el curso de la cavitación.



**Figura 1-4:** Diagrama de presión – temperatura del agua.

**Realizado por:** (López & Ramírez, 2011, pág. 25)

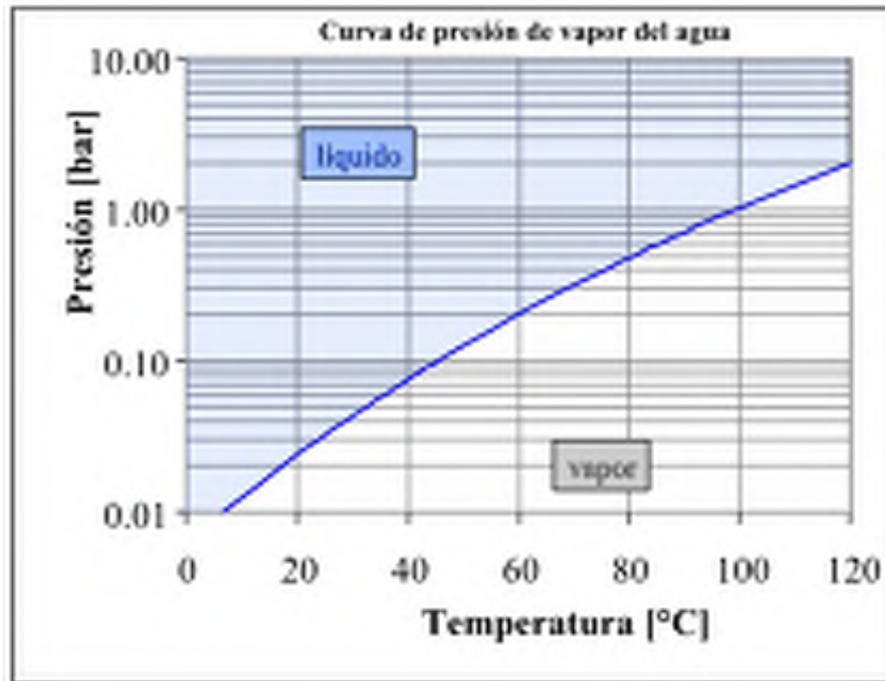
### 1.12.1. Evolución de la cavitación



**Figura 1-5:** Diagrama de fases del agua.

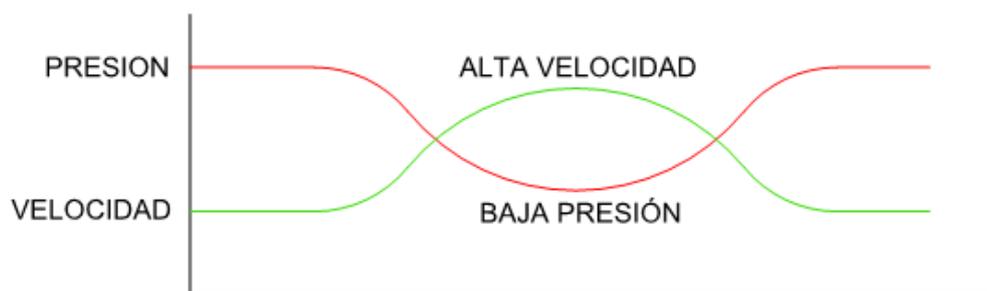
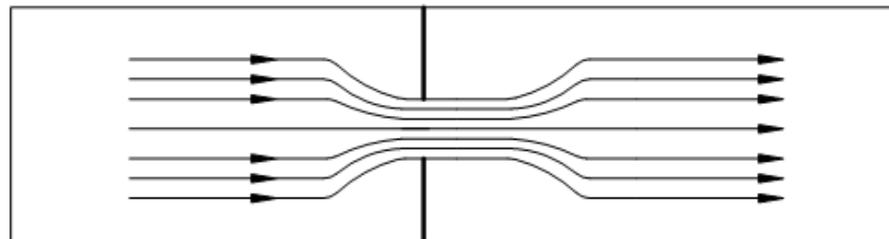
**Realizado por:** (Urvina Pérez, 2016, pág. 10)

Este fenómeno se explica como la aparición de cavidades de vapor dentro de un medio líquido inicialmente homogéneo por acciones de las presiones bajas, es decir, el campo de presiones oscila alrededor de la presión de vaporización  $P_v$ . En la Figura 1-5, la curva que va desde el punto triple  $T_r$  hasta el punto crítico  $C$ , separa las fases líquido y vapor. Al considerar un punto con determinadas condiciones de presión y temperatura del fluido (ubicar punto  $F$  en la Figura 1-5), si aumenta la temperatura y se mantiene constante la presión se da el proceso de ebullición, mientras que si la presión disminuye manteniendo constante la temperatura se produce el proceso de cavitación (Urvina Pérez, 2016, pág. 9).



**Figura 1-6:** Curva característica de la presión de vapor.

Realizado por: (Agrònoms, 2019, pág. 13)



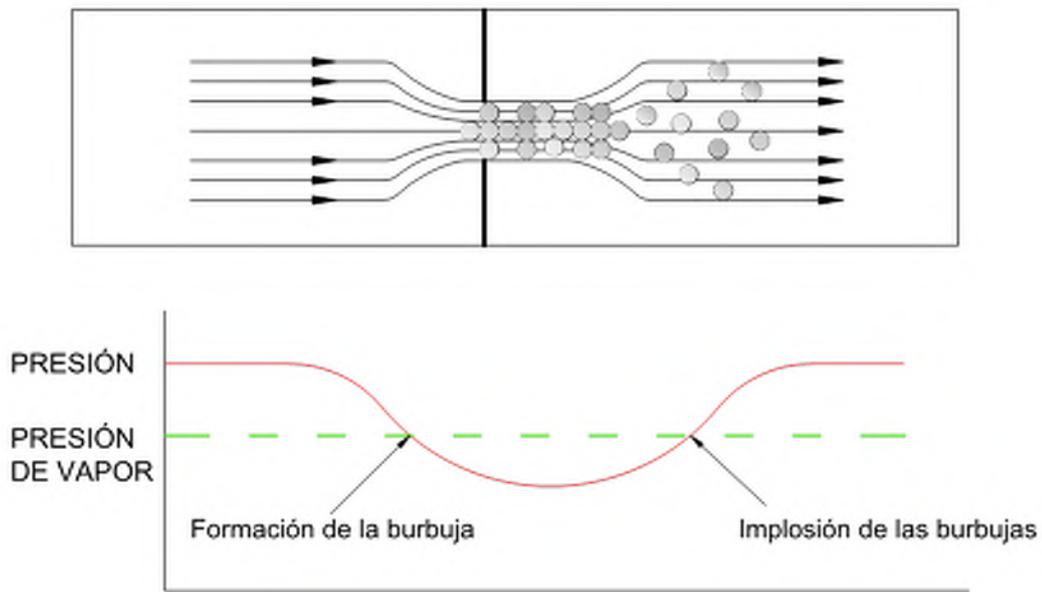
**Figura 1-7:** Estrechamiento en el trayecto del fluido.

Realizado por: Autores

En el caso de la turbina Francis la temperatura de trabajo del agua es constante, por lo que las burbujas se forman debido al gradiente de presión y velocidad generado entre los álabes del rodete, lo que en una primera fase provoca que la presión del líquido caiga por debajo de la presión

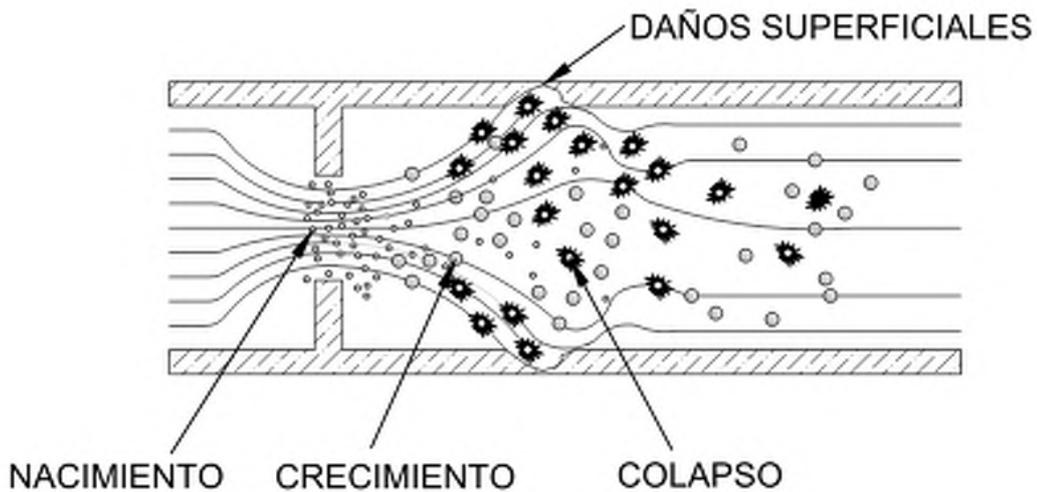
de saturación ( $P_v$ ) cambiando instantáneamente de estado líquido a gaseoso. En una segunda fase debido a la geometría del rodete las burbujas vuelven a ganar presión, cambiando nuevamente de estado gaseoso a líquido y es en este transcurso cuando implosionan violentamente contra su superficie, fenómeno que al ser cíclico y constante representa un gran riesgo para la integridad del material.

La Figura 1-7, Figura 1-8 y Figura 1-9 nos describe de mejor manera el comportamiento de la cavitación desde que se forman hasta que terminan provocando los daños superficiales.



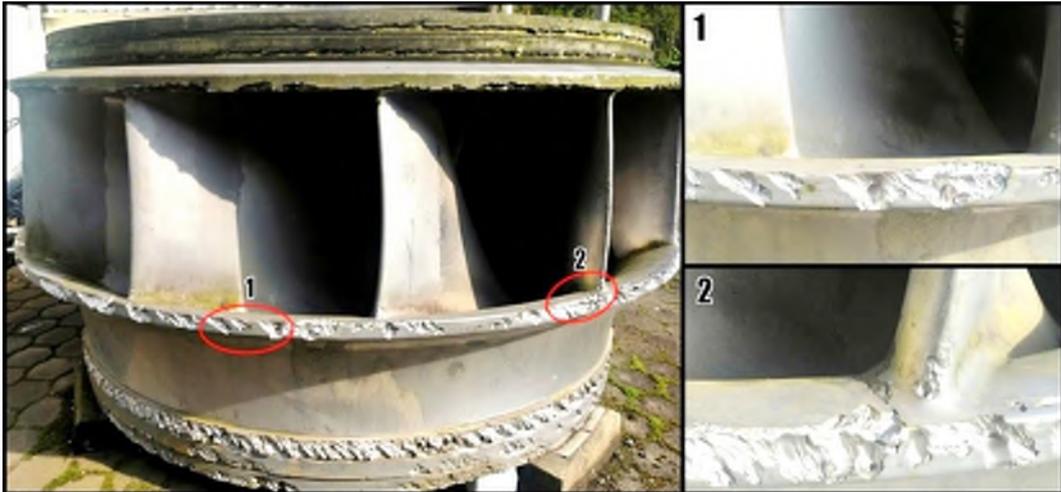
**Figura 1-8:** Formación de burbujas en zonas de sección reducida.

Realizado por: Autores



**Figura 1-9:** Implosión de burbujas tras aumentar su presión.

Realizado por: Autores



**Figura 1-10:** Desgaste superficial detectada en el rodete de la Unidad 2 de la Central San Francisco.

**Realizado por:** Autores

### 1.13. Material compuesto

Un material de esta naturaleza está formado por dos o más materiales diferentes, con la presencia o no de una reacción química mutua con el fin de otorgarle al producto final propiedades mejoradas con respecto a las de cada material en forma independiente.

Desde otro entorno puede ser definido como un “sistema material” formado por la unión de dos o más microconstituyentes o macro constituyentes con propiedades físicas, químicas y mecánicas completamente diferentes siendo insolubles entre sí, para que estos puedan ser identificados físicamente debido a su heterogeneidad. Este tipo de materiales está formado por dos partes principales:

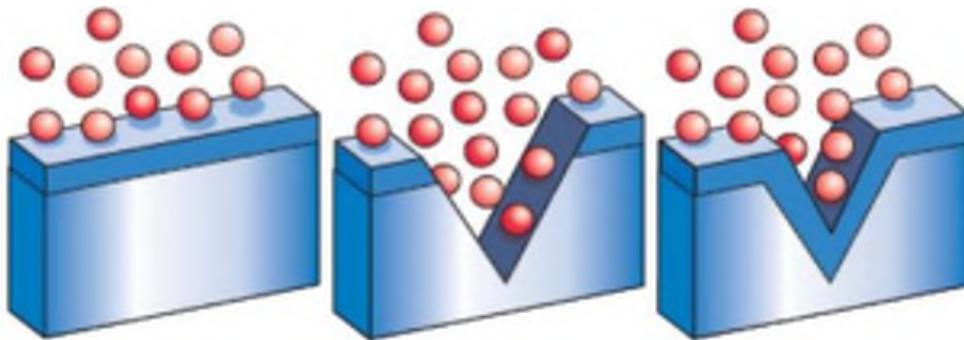
- Matriz, formada por una fase continua de menor rigidez.
- Refuerzo, formado por una fase discontinua de mayor rigidez.

La matriz cumple la función de brindar estabilidad al conjunto transfiriendo las cargas al refuerzo. Los álabes del rodete junto con el recubrimiento de carburo de tungsteno adoptan una configuración similar a la de un material compuesto, ya que ambos materiales poseen propiedades mecánicas y químicas completamente diferentes. Mientras los álabes actúan como matriz el recubrimiento metalizado actúa como refuerzo con la tarea de absorber tensiones y brindar una mayor dureza al rodete.

#### 1.14. Acero ASTM A743 grado CA-6NM

Según (Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 11), este material es un acero de tipo martensítico inoxidable obtenido por fundición. Gracias a sus elevadas propiedades mecánicas de resistencia y dureza este material es muy resistente a la cavitación, erosión y agrietamiento por lo que es utilizado para la fabricación de rodetes, diafragmas, difusores de turbinas, válvulas, etc.

Este tipo de material inoxidable tiene la característica de regenerarse gracias a un proceso de pasivación de su capa de óxido de cromo (véase la Figura 1-11). Se trata de una capa delgada que el acero ASTM A743 grado CA-6NM posee debido a que su principal elemento aleante es precisamente el cromo con un porcentaje en peso de alrededor de 10,5-18%.



**Figura 1-11:** Proceso de pasivación en un acero inoxidable.

**Realizado por:** (Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 11)

La aleación CA6NM tiene una importante acogida para la fabricación de partes hidráulicas especialmente porque tienen excelentes propiedades de resistencia, soldabilidad y tenacidad. La norma ASTM A743 designa este material como el grado CA6NM, cada letra anuncia una característica de esta aleación y su composición química, la Tabla 1-2 nos proporciona la información referente a este grado. De este como la letra C, indica que es una aleación resistente a ataques corrosivos a temperaturas inferiores a 650°C; a continuación, la letra de la nomenclatura: A, representa la relación entre los contenidos de cromo y níquel, cuya cantidad varía en una relación directa, el porcentaje máximo de carbono está representado por el número 6, multiplicado por 100, y las últimas letras indican la presencia de elementos de aleación adicionales en el acero: níquel y molibdeno (Balseca & Telenchana, 2019, pág. 47).

**Tabla 1-2:** Características de la denominación del acero CA-6NM.

Denominación	Característica
C	Servicio para ambientes corrosivos líquidos menores a 650°C
A	Relación entre los contenidos de Cr y Ni
6	Contenido de carbono en porcentaje en peso multiplicado por 100
N	Presencia de níquel
M	Presencia de molibdeno

Fuente: (Cañizares &amp; Quinchuela, 2017, pág. 20)

Realizado por: Autores

**1.14.1. Propiedades del acero ASTM a743 grado CA-6NM****1.14.1.1. Composición química del acero ASTM A743 grado CA-6NM**

La composición que presenta el acero ASTM A643 grado CA-6NM (véase la Tabla 1-3), tiene una gran influencia en la microestructura de este, y al tener tales porcentajes de Cr, Ni y C constituyen a la formación de una matriz martensítica a temperatura ambiente.

**Tabla 1-3:** Composición química ASTM A743 Gr. CA6NM.

Grado (UNS)	Composición (%)							
	C <sub>máx</sub>	Mn <sub>máx</sub>	Si <sub>máx</sub>	P <sub>máx</sub>	S <sub>máx</sub>	Cr	Ni	Mo
CA6NM (J91540)	0.06	1.00	1.00	0.04	0.03	11.5-12.4	3.5-4.5	0.40-1.0

Fuente: (ASTM A743)

Realizado por: Autores

**1.14.1.2. Propiedades Mecánicas del acero ASTM A743 grado CA-6NM****Tabla 1-4:** Propiedades mecánicas ASTM A743 Gr. CA6NM.

Grado	Esfuerzo de tensión min		Esfuerzo último, min		Elongación en 2 in (50 mm) min, %	Reducción de área min, %
	ksi	Mpa	ksi	Mpa		
CA6NM	110	755	80	550	15	35
Módulo elástico			200 000		N/mm <sup>2</sup>	
Módulo de Poisson			0,24			
Módulo de corte			76 000		N/mm <sup>2</sup>	
Densidad			7 800		Kg/m <sup>3</sup>	
Límite elástico			930		N/mm <sup>2</sup>	
Coef. expansión térmica			15		x10 <sup>-6</sup> /K	
Conductividad térmica			25		W/(m. K)	
Calor específico			480		J/(Kg. K)	

Fuente: (ASTM A743)

Realizado por: Autores

La Tabla 1-4 nos presenta algunas propiedades mecánicas de interés, siendo la dureza máxima para este acero corresponde a 285HB (ASTM A743, pág. 6).

## 1.15. Proceso de metalizado en rodetes

### 1.15.1. Limpieza de la superficie

La capacidad que posee el recubrimiento para adherirse sobre el perfil de anclaje del material base define su rendimiento, pues aumenta la durabilidad del material base, razón por la cual es importante preparar la superficie de manera adecuada eliminando todo residuo contaminante<sup>4</sup> presente, que impida una correcta adherencia de la capa de revestimiento sobre el perfil de anclaje.

### 1.15.2. Normas SSPC

El proceso de preparación de la superficie se encuentra normalizado por entes internacionales que establecen los distintos grados de preparación superficial. La Tabla 1-5, nos presenta algunas normas de carácter internacional con las cuales se lleva a cabo la preparación de la superficie. La Tabla 1-6, en cambio nos muestra los tipos de limpieza que indica la norma SSPC.

**Tabla 1-5:** Normas internacionales para preparación de superficies.

Norma SIS <sup>5</sup>	Norma Americana	Norma SSPC	Norma Francesa	Norma Inglesa	Norma NACE <sup>6</sup>
SA 3	Metal blanco	SP 5	DS 3	1st Quality	Nace 1
SA 2 1/2	Semi blanco	SP 10	DS 2,5	2nd Quality	Nace 2
SA 2	Comercial	SP 6	DS 2,5	3rd Quality	Nace 3
SA 1	Cepillado granallado ligero	SP 7	DS 1		Nace 4

Fuente: (SSPC-SP COM, 2004)

**Realizado por:** Autores

En Latinoamérica se utiliza la norma SSPC<sup>7</sup>, que se basa en comparar la superficie objeto de tratamiento con un patrón fotográfico previamente definido asignando diferentes grados de herrumbre<sup>8</sup>, sobre los cuales se deberá aplicar uno de los procesos sugeridos para preparar la

<sup>4</sup> Restos de pintura, recubrimientos anteriores, impurezas generadas por la aparición de óxidos o restos de procesos de mecanizado sobre la pieza.

<sup>5</sup> Swedish Standards Institution - Stockholm Sweden

<sup>6</sup> National Association of Corrosion Engineers.

<sup>7</sup> Steel Structures Painting Council – Pittsburgh USA:

<sup>8</sup> Capa de óxido formada sobre la superficie de los metales provocada por la humedad.

superficie. En sí, el tipo de limpieza relaciona la uniformidad superficial que el granallado debe cubrir cotejando sus resultados con el patrón fotográfico definido por la norma SSPC.

**Tabla 1-6:** Tipos de limpieza según la Norma SSPC.

Norma SSPC	Descripción	
	Tipo de limpieza	Herramientas
SSPC-SP 1	Solventes	
SSPC-SP 2	Herramientas manuales	Cepillos, lijas, etc.
SSPC-SP 3	Herramientas manuales mecánicas.	Eléctricas o neumáticas
SSPC-SP 5	Chorro de abrasivo	Granallado metal blanco
SSPC-SP 6	Chorro de abrasivo	Granallado comercial
SSPC-SP 7	Chorro de abrasivo	Granallado ligero
SSPC-SP 10	Chorro de abrasivo	Granallado semi blanco
SSPC-SP 11	Manual con herramientas mecánicas.	Metal limpio, rugosidad min 25 $\mu\text{m}$
SSPC-SP 12	Water jeting <sup>9</sup>	
SSPC-SP 15	Manual con herramientas mecánicas	Limpieza comercial, $\epsilon$ min. 25 $\mu\text{m}$

Fuente: (SSPC-SP COM, 2004)

Realizado por: Autores

### 1.15.3. *Proceso de granallado*

Para aplicar un metalizado a partes hidráulicas, es necesario la realización de un proceso de limpieza de la superficie a ser tratada. Una de las técnicas más eficientes para obtener una correcta preparación superficial y buena limpieza es el granallado, se trata de una técnica por impacto con la que se consigue remover revestimientos presentes en la superficie y contaminantes óxidos (pintura, soldadura, etc.), de esta manera se limpia y se consigue proporcionar a la superficie de un perfil de anclaje que facilita la adherencia ante la aplicación de metalizado posterior.

El proceso de granallado consiste en una operación de “bombardeo” en la que un sin número de partículas abrasivas son lanzadas a alta velocidad (65 – 110 m/s), contra el objetivo y que al impactar con la superficie tratada produce la remoción de los contaminantes en ella presentes (Torres Jaramillo, 2013, pág. 4). Además, produce en la superficie del metal un aumento de área en relación con la superficie lisa, aumenta de esa manera la superficie de contacto y crea sobre la misma forma irregulares con aristas y bordes que constituyen reales anclajes entre el metal y el

<sup>9</sup> Proceso en el que un chorro de agua a alta presión alcanza una alta velocidad que le permite lograr varios niveles de limpieza en una superficie.

revestimiento. Para garantizar así un aumento en la adherencia entre el metal base y el revestimiento aplicado (Salazar Freire, 2017, pág. 19).

La eficiencia del trabajo efectivo de limpieza depende de factores relacionados con el ángulo de incidencia del chorro, las características del abrasivo utilizado y al tipo de impureza a retirar (Torres Jaramillo, 2013, pág. 5)

#### 1.15.3.1. Tamaño de grano para granallado

La rugosidad que logra el granallado dependerá del abrasivo utilizado, además de la dureza de la superficie a tratar permitiendo lograr rugosidades de 0,75 a 5  $\mu\text{m}$  (Torres Jaramillo, 2013, pág. 20), la selección del tamaño de grano se determina, en parte, por la rugosidad requerida para una adhesión adecuada y puede estar limitado por el espesor del revestimiento (Salazar Freire, 2017, pág. 19).

La Tabla 1-7, que se muestra a continuación proporciona recomendaciones generales para la selección del tamaño de grano a utilizar en un proceso de granallado.

**Tabla 1-7:** Tamaño de grano recomendado para preparación de superficies en recubrimientos.

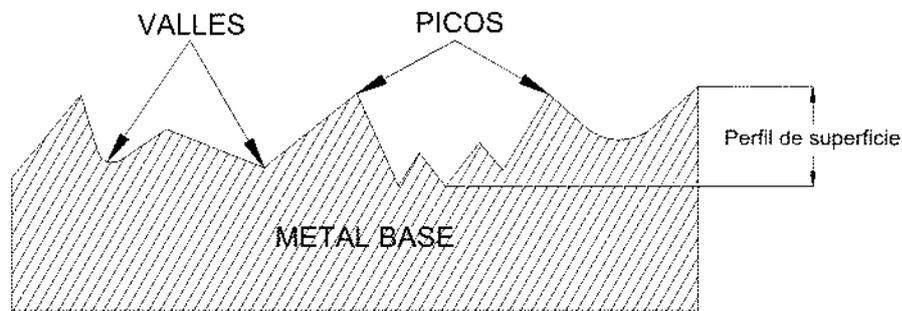
Rugosidad	Tamaño de grano, malla	Abertura de manguito		Aplicaciones
		mm	in	
Grueso	-10/+30	2.007/0.610	0.079/0.024	Para recubrimientos que superen 0.25 mm (0.010 in) y mejor adherencia.
Mediano	-14/+40	1.422/0.432	0.056/0.017	Para una adherencia justa y acabado más suaves de recubrimientos de menos de 0.25 mm (0.010 in) de espesor.
Fino	-30/+80	0.610/0.175	0.024/0.007	Para un acabado más suave en revestimiento de menos de 0.25 mm de espesor para ser usados en la condición de pulverizado.

Fuente: (HANDBOOK, 1994)

Realizado por: Autores

### 1.15.4. Perfil de anclaje

Es el grado de rugosidad que posee una superficie limpia para asegurar la correcta adherencia de la capa de recubrimiento que se colocará sobre el perfil. Dependiendo del sistema de medida la rugosidad estará expresada en **mils**<sup>10</sup> o en **micrones**<sup>11</sup>.



**Figura 1-12:** Perfil de anclaje o rugosidad.

**Realizado por:** Autores

El perfil de anclaje de la superficie tratada depende directamente del tipo de abrasivo y la metodología utilizada durante el proceso de granallado y queda definido como un promedio entre la profundidad de los picos y valles generados por el contacto de la superficie metálica con el material abrasivo.

A mayor tamaño de la película del recubrimiento la rugosidad requerida aumenta.

**Tabla 1-8:** Alturas de perfil de anclaje en acero según el tipo de abrasivo utilizado.

Abrasivo	Perfil de anclaje				
	25 µm	37 µm	50 µm	63 µm	75-100 µm
Silicio	Malla 30/60	Malla 30/60	Malla 30/60	Malla 30/60	Malla 30/60
Acero	G80	G50	G40	G40	G25
Explosión	S110	S170	S280	S330	S390
Garnet	Malla 80	Malla 36	Malla 36	Malla 16	Malla 16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Malla 100	Malla 50	Malla 36	Malla 24	Malla 16

**Fuente:** (SSPC-SP COM, 2004)

**Realizado por:** Autores

<sup>10</sup> Unidad de medida de longitud del sistema inglés equivalente a una milésima de pulgada.

<sup>11</sup> Unidad de longitud correspondiente al Sistema Internacional equivalente a una milésima de milímetro

Las alturas del perfil de anclaje señaladas en la Tabla 1-8, corresponden a presiones comprendidas entre 620 y 700 kPa en la boquilla de salida del equipo de granallado.

Un correcto perfil de anclaje implica que la superficie tratada debe estar limpia, es decir, poseer una apariencia casi blanca durante una verificación visual, libre de contaminantes líquidos como aceites, grasas, polvos u otros. Complementario a la limpieza el perfil ha de ser de tipo angular, no pulida ya que ha de tener un aspecto como presenta la Figura 1-12, puesto que si el perfil es muy bajo se reducirá notablemente la capacidad de adherencia de la capa de revestimiento mientras que si es muy alto los picos del perfil corren el riesgo de quedar libres sin revestimiento.

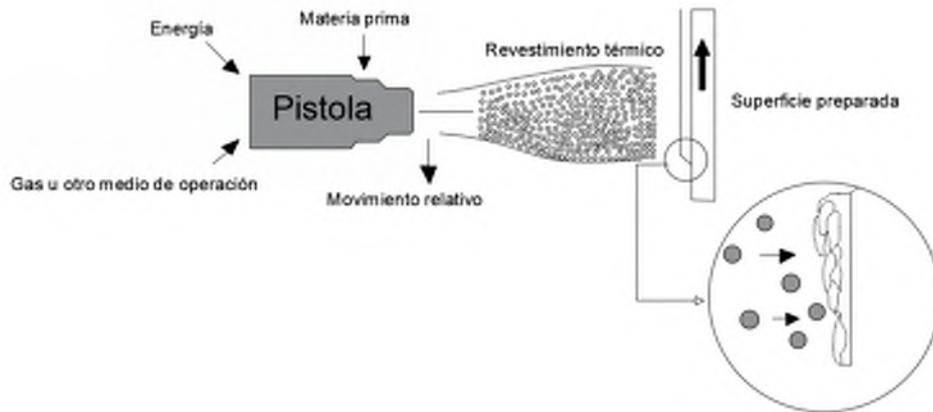
La norma ISO 8503-12 define a la rugosidad como la altura existente entre los picos y los valles del perfil de anclaje, mientras que la norma ASTM3 D71274 la señala como el rango de desviaciones positivas y negativas leídas verticalmente desde una línea intermedia entre picos y valles.

#### ***1.15.5. Recubrimiento metálico***

El recubrimiento de partes metálicas consiste en la realización de un termorociado o rociado térmico, dicho proceso se realiza con la finalidad de recuperar dimensiones de partes desgastadas o para colocar una capa de refuerzo de superficies expuestas a desgaste de manera que se consiga alargar su vida útil. Estos procesos se pueden agrupar en categorías que a su vez se subdividen en otras categorías en función de distintas características o parámetros de aplicación. En general las categorías son:

- Rociado por flama.
- Rociado por arco eléctrico.
- Rociado por arco de plasma.

El rociado térmico es una serie de procesos importantes en los que los recubrimientos de diversos metales, aleaciones, carburos, cerámicos y polímeros se aplican a superficies metálicas mediante una pistola de rociado con una corriente de flama de oxiacetileno, arco eléctrico o arco de plasma. El material de recubrimiento puede tener forma de alambre, varilla o polvo y cuando las gotas o partículas impactan la pieza de trabajo, se solidifican y unen a la superficie, como se muestra en la Figura 1-13, (Salazar Freire, 2017, pág. 7).



**Figura 1-13:** Esquema proceso de metalizado.

**Realizado por:** (Salazar Freire, 2017, pág. 8)

Ventajas:

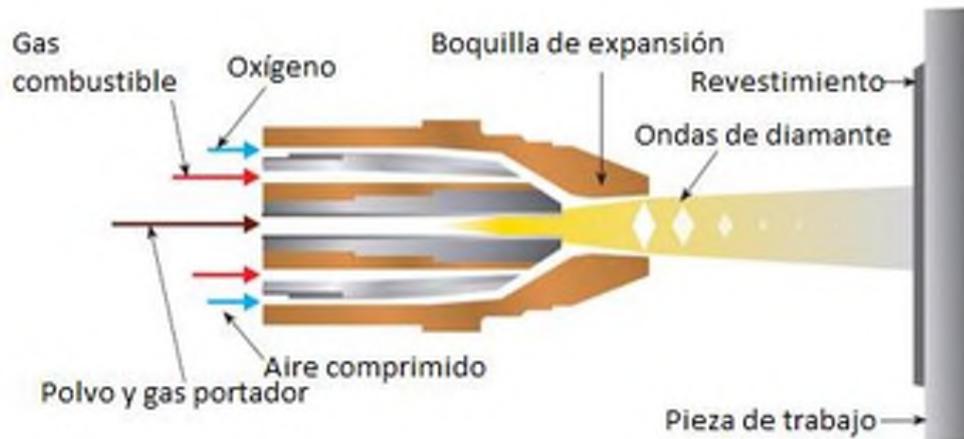
Las ventajas que proporciona este tipo de proceso vienen dadas por la formación de una microestructura laminar única.

- El proceso posee la versatilidad de emplear variedad de materiales que puedan fundirse sin descomponerse.
- Gran parte de los procesos aplican el recubrimiento sin necesidad de aportar calor de forma significante.
- Los procesos en su mayoría también poseen la habilidad de retirar recubrimientos y volverlos aplicar sin provocar daños a la pieza tratada, daños en forma de alteración de dimensiones o propiedades.

#### **1.15.6. Metalizado por combustión a alta velocidad (HVOF)**

Este es un proceso el cual utiliza un chorro supersónico, que lo distingue de la pulverización de flama tradicional, en la que la velocidad de impacto sobre el sustrato es mucho más alta, lo que proporciona una mejora en las características del revestimiento. Se pueden utilizar gases combustibles como propano, propileno, acetileno, hidrógeno y gas natural, así como combustibles líquidos como el queroseno; adicionalmente se utiliza oxígeno como comburente de forma continua, esta mezcla crea una fuente de combustión estable, estos gases se restringen a la salida de la cámara de combustión para producir una aceleración supersónica, en el cañón se inyecta el polvo dentro de la corriente de gases salientes, aquí las partículas se calientan y se aceleran para ser impactadas sobre el sustrato, en la Figura 1-14 se muestra un esquema del proceso (Salazar Freire, 2017, págs. 12-13).

Este proceso para que pueda obtener un revestimiento eficaz debe combinar ciertos parámetros como una elevada temperatura y velocidad. Estos parámetros son fundamentales en un proceso HVOF.



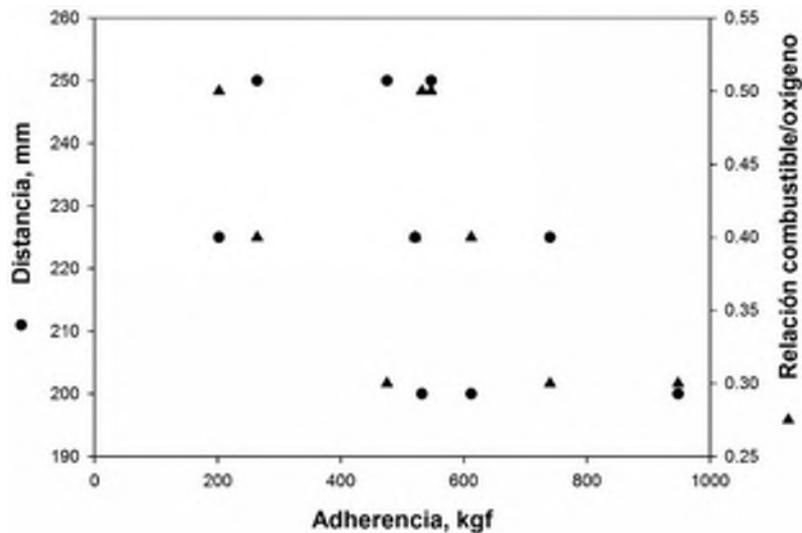
**Figura 1-14:** Diagrama del proceso de metalizado por HVOF.

Realizado por: (Salazar Freire, 2017, pág. 13)

Entre las variables que afectan a la calidad de un recubrimiento se destacan: Características físico-químico del polvo (forma, tamaño y distribución), inyectores de polvo, superficie del sustrato (grado de limpieza, rugosidad),  $D_p$  (distancia entre la boquilla de proyección y la superficie del sustrato), gases de proyección, desplazamiento relativo boquilla-sustrato (velocidad), ángulo de proyección (ángulo de incidencia del polvo proyectado en el momento del impacto con la superficie a recubrir) (Punset Fuste, 2018, pág. 45).

Según (Guevara Chávez & Acevedo Dávila, 2016, pág. 232), mediante diseño experimental se ha detectado que en un proceso HVOF usando como polvo Fe-Cr-Mo (*Diamalloy 1008*), se obtiene mejores recubrimientos si la distancia de aplicación es corta y las relaciones de combustible/oxígeno ( $c/o$ ) son bajas. Además, la experimentación muestra que relaciones de  $c/o$  altas promueve la formación de óxido en la superficie del material, debido a la falta de combustión completa lo cual afecta directamente a la coalescencia del recubrimiento con el sustrato y promueve el desprendimiento prematuro del depósito cuando este sea sometido a tensión o desgaste.

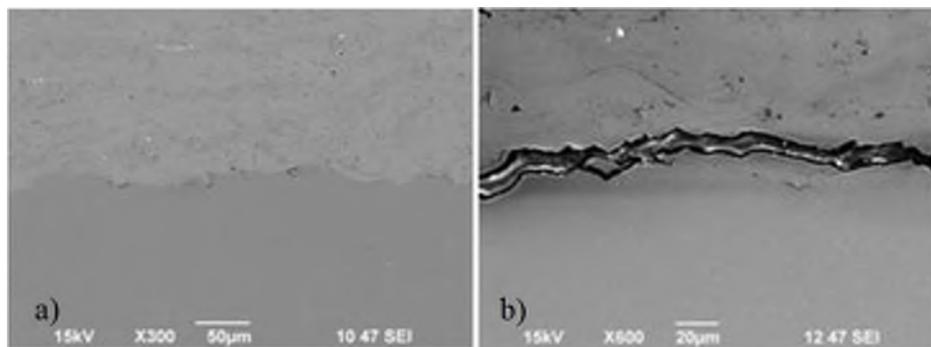
En la Figura 1-15, las relaciones de  $c/o$  altas poseen un mayor contenido de oxígeno, dando lugar a que la relación estequiométrica de combustión se aleje y surja la formación de especies oxidadas en la superficie, provocando que el recubrimiento no se ancle de forma correcta en la superficie del material (Guevara Chávez & Acevedo Dávila, 2016, pág. 234).



**Figura 1-15:** Relación distancia y c/o para adherencia en proceso HVOF.

**Realizado por:** (Guevara Chávez & Acevedo Dávila, 2016, pág. 234)

La Figura 1-16, muestra mediante experimentación realizada, el comportamiento del recubrimiento cuando la relación de c/o es baja (Figura 1-16a) y alta (Figura 1-16b). En una relación c/o alta se aprecia la discontinuidad entre materiales como consecuencia de una combustión incompleta y por ende una no coalescencia de recubrimiento y superficie de material.



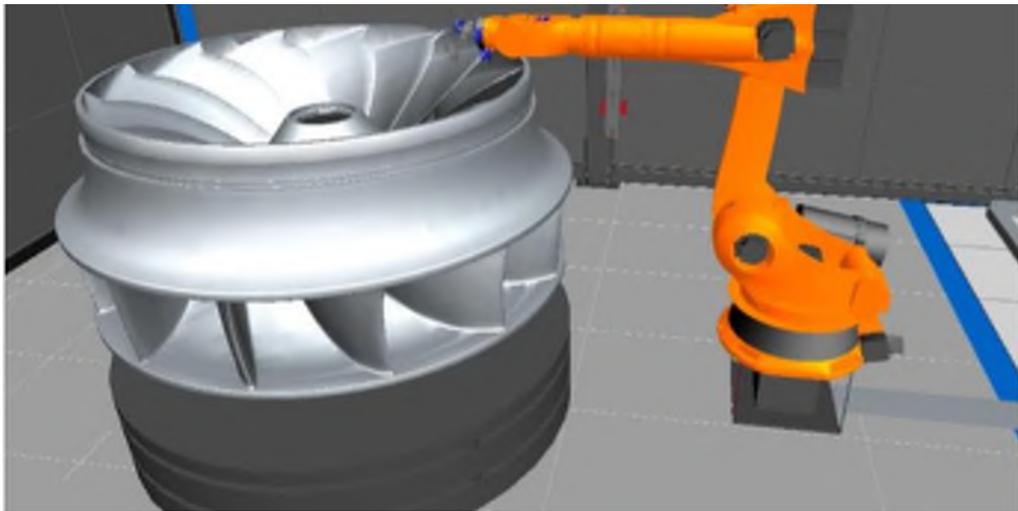
**Figura 1-16:** Imágenes por microscopía electrónica de barrido a) 0.3 c/o y b) 0.5 c/o.

**Realizado por:** (Guevara Chávez & Acevedo Dávila, 2016, pág. 235)

#### 1.15.6.1. Componentes y sistemas del proceso HVOF

El proceso HVOF es un proceso con cierta complejidad por lo que requiere de componentes con altas exigencias para su ejecución. Además de los sistemas que componen el proceso es necesario la inclusión de un robot (véase Figura 1-17), para un metalizado final más eficiente. Los componentes de este proceso son:

- Cabina insonorizada
- Filtro industrial
- Enfriador de agua
- Pistola de HVOF
- Alimentador de material
- Controlador de material
- Soporte para las piezas
- Sistema de ventilación
- Sistema de granallado



**Figura 1-17:** Aplicación de recubrimiento mediante proceso HVOF con brazo robótico.

**Realizado por:** (Salazar Freire, 2017, pág. 59)

#### 1.15.6.2. Materiales para un proceso HVOF

**Tabla 1-9:** Clases comunes de materiales en polvo para recubrimiento.

Clase Material	Aleación típica	Característica	Aplicación
Metales puros	Zn	Protección a la corrosión	Construcción de puentes
Aleación auto fundente	FeNiBSi	Porosidad mínima de fusión	Ejes, rodamientos
MCrAlY	NiCrAlY	Resistencia a la corrosión	Álabes de turbinas de gas
Níquel-grafito	Ni25C	Anti-rozamiento	Conductos de entrada
Óxidos	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Resistencia a la oxidación	Industria Textil
Carburos	WC12Co	Resistencia al desgaste	Ejes, Turbinas

**Fuente:** (SULZER, 2016)

**Realizado por:** Autores

Los materiales que se pueden utilizar para realizar procesos de metalizado dependen de la aplicación a la cual va a estar sometida el componente, se pueden encontrar en forma de alambre o polvo, la Tabla 1-9 muestra materiales comunes junto con su característica y posibles usos.

### ***1.15.7. Sobre espesor en recubrimientos metálicos***

El (Handbook, 2004), indica que la aportación de un equipo de HVOF debe ser de 30 pases para obtener un recubrimiento de 0.38 mm en 10 segundos.

Si una capa es muy delgada, el poder cubriente y la capacidad de protección serán inadecuadas y se perderá el tiempo en recubrir de nuevo la superficie. Si una aplicación del recubrimiento es excesivamente gruesa, aparecerán fallos de cuarteamiento, desconchados o excesivo tiempo de secado o curado. También está el factor del coste de aplicar mucho recubrimiento.

### ***1.15.8. Fallas de adhesión***

Los recubrimientos metálicos se basan en la adherencia sobre la superficie a aplicarse, por ende, la falta de adherencia es una causa directa para el fallo de los recubrimientos.

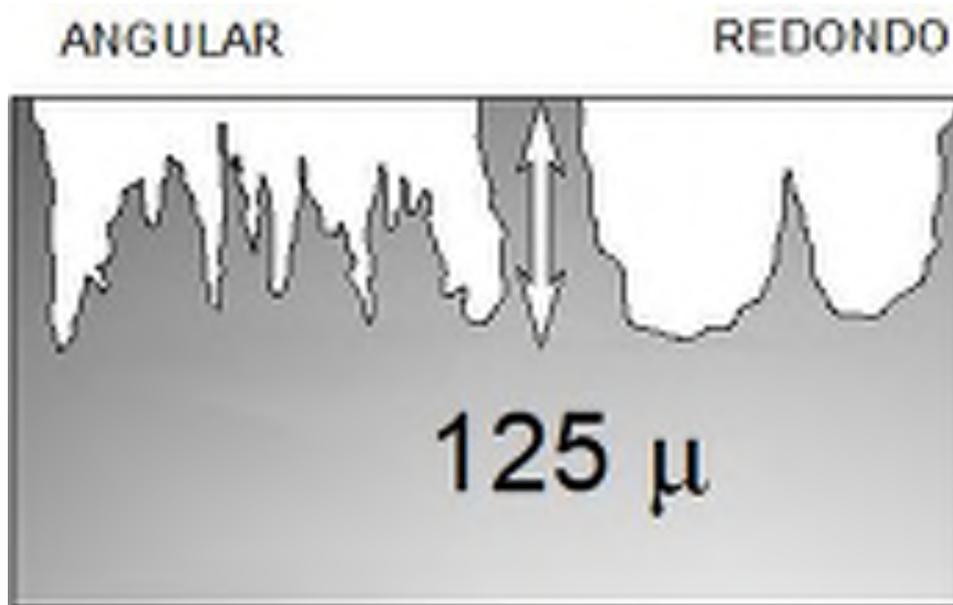
Las causas más comunes de la falta de adherencia pueden ser:

- Presencia de cloruros, sulfatos y nitratos sobre la superficie.
- Incorrecta preparación de la superficie, presencia de contaminantes.
- Inadecuado perfil de anclaje.

La adhesión no es más que la interacción de fuerzas físicas y químicas entre el recubrimiento y el sustrato. Por tanto, una buena preparación de la superficie influye en gran manera para que, junto con la correcta aplicación del recubrimiento, se logre una adecuada adherencia de estos. La adecuada preparación superficial, implica evitar dejar contaminación debajo del revestimiento, ya que eso conlleva un alto riesgo de fallo prematuro del revestimiento aplicado.

La creación del perfil de anclaje es muy importante, ya que determina en gran medida el anclaje mecánico de un recubrimiento sobre el metal. El perfil llamado también patrón de anclaje debería aparecer en la especificación y está determinado por el fabricante del recubrimiento. Un patrón de anclaje demasiado profundo puede contener picos o crestas que pueden no quedar adecuadamente cubiertas por el recubrimiento, dejando zonas expuestas a la corrosión o puede ser que no tenga la rugosidad suficiente, causando falla del recubrimiento debido a pérdida de adhesión (Cardona, 2017).

Los perfiles de anclaje pueden ser angulares o redondos dependiendo del tipo de abrasivo utilizado como se muestra en la Figura 1-18.



**Figura 1-18:** Tipos de perfil de anclaje.

Realizado por: Autores

#### ***1.15.9. Contaminación de óxidos e incrustación en recubrimientos***

Se debe tener especial cuidado al aplicar la capa de metalizado sobre la superficie metálica, especialmente con las condiciones ambientales del entorno para evitar en lo posible que las partículas en suspensión del aire se depositen en las capas de carburo de tungsteno, provocando fallas microscópicas en la adherencia del recubrimiento o alojamiento de partículas de óxido que resultarían perjudiciales.

#### ***1.15.10. Carburo de tungsteno***

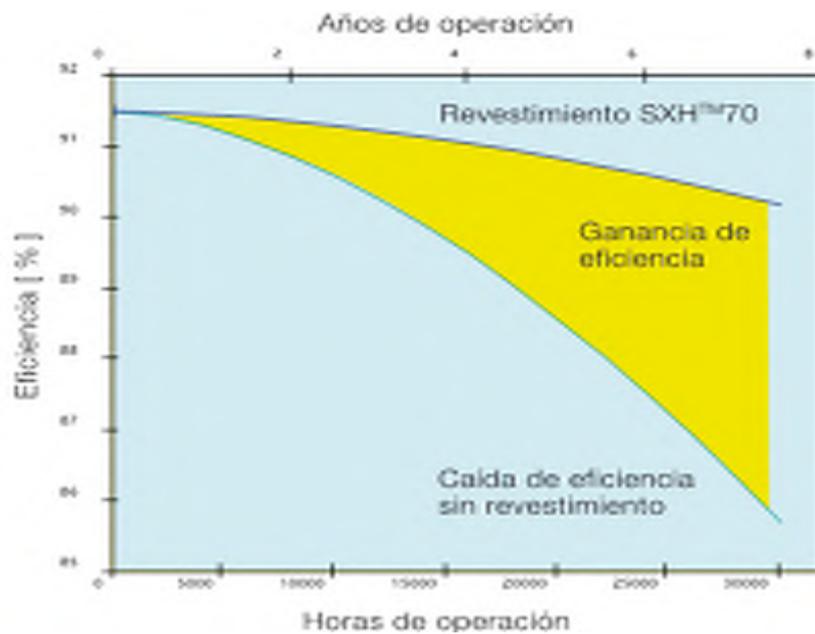
Es un compuesto cerámico de tipo inorgánico de coloración gris formado por partículas de carbono y tungsteno en partes iguales, que tiene como propiedad particular un alto punto de ebullición lo que lo hace ideal para trabajar en ambientes de temperatura extrema, así como también su elevada dureza con un módulo de Young aproximado de 550 GPa como se indica en la Tabla 1-10, lo que lo convierten en un material mucho más rígido y denso que el acero y titanio.

**Tabla 1-10:** Propiedades del carburo de tungsteno.

CALIDAD		WCN i6%	WCCo6%	WCCo8%	WCCo11%
PROPIEDADES FISICAS	Unidades				
Densidad	g / cm <sup>3</sup>	14,5 - 14,9			
Código ISO		--	K10 – K20	K30	K40
Dureza Rockwell	HRA	90	90,5	89,5	86,5
Dureza Vickers	HV50	1590	1600	1400	1200
Resistencia a la flexión	MPa	1550	1800	2200	2500
Módulo de Young	N / mm <sup>2</sup>	630000			
Límite elástico	N / mm <sup>2</sup>	550			
Resistencia a la tracción	N / mm <sup>2</sup>	344,8			
Módulo de corte	N / mm <sup>2</sup>	27000			
Módulo de Poisson		0,24			
Coefficiente de dilatación	10 <sup>-6</sup> / K	5,2	5	5	6,8
Conductividad térmica	W / m K	60 - 90			
Calor específico	J / kg K	280			
Temperatura de trabajo	°C	400			
COMPOSICIÓN					
WC	%	94	94	92	89
Co	%	--	6	8	11
Ni	%	6	--	--	--

Fuente: (CARBONES Y SISTEMAS, 2019)

Realizado por: Autores



**Figura 1-19:** Influencia del revestimiento en el desarrollo de la eficiencia durante la operación con alta erosión hidro-abrasiva.

Realizado por: (Andritz Hydro AG, 2011, pág. 5)

La aplicación de varias capas superficiales de carburo de tungsteno como protección al rodete presenta una solución ante la problemática de la erosión abrasiva. Debido a sus propiedades

mecánicas este revestimiento tiene una dureza y densidad elevadas, lo que le otorga una mayor resistencia ante los impactos de sólidos suspendidos con riesgo de que estos modifiquen el perfil hidráulico del rodete reduciendo su eficiencia.

#### 1.15.10.1. Proveedores de carburo de tungsteno

##### 1.15.10.1.1. Carbosystem

Es una empresa española dedicada a proveer materiales cerámicos avanzados y piezas de grafito. Entre los materiales que provee, se encuentra el carburo de tungsteno (wolframio), un material compuesto formado a base de wolframio y carbono, este material también es conocido como *widia*, la Tabla 1-11, nos proporciona algunas propiedades. Presentan dos denominaciones:

- WCNi6%. - Con 6% Níquel, que presenta una menor corrosión.
- WCCo6%. - Con 6% Cobalto, para obtener una mayor dureza.

**Tabla 1-11:** Propiedades del carburo de tungsteno.

Propiedades		WCNi6%	WCCo6%
Contenido	%	6% Ni	6% Co
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	14,5-14,9	14,6-15,0
Resistencia a compresión	MPa	5600	5800
Resistencia a flexión	MPa	1550	1720
Dureza	HRA	89,5	89,5
Conductividad térmica	W/mK	80	80
Coefficiente de dilatación	10-6/°C	5,2	5,0
Temperatura máxima	°C	400	350

Fuente: (CARBONES Y SISTEMAS, 2019)

Realizado por: Autores

##### 1.15.10.1.2. Andritz Hydro

Es un proveedor de sistemas hidráulicos para centrales de tipo hidroeléctricas a nivel mundial con años de experiencia en el mercado.

Actualmente la empresa utiliza como recubrimiento principal de sus elementos el SXH™70. Un material que tiene por característica principal, la combinación de sus partículas con el material sustrato o metal base aplicado mediante procesos HVOF

### 1.15.10.1.3. Xiame Ninesun IMP. & EXP. CO. LTD.

Es una empresa con sede en China, que se dedica a la fabricación y tratamiento de metales no ferrosos. Proveen principalmente productos de cobre, aluminio y aleaciones de tungsteno. Poseen una certificación ISO 9001, denominando a su producto como WC-12CO aglomerado y sinterizado que es un polvo recubierto a base de cobalto con alta dureza. Mediante el proceso de sintetización por aglomeración, WC-CO12 se recubre con una capa de metal de cobalto en la superficie de carburo de tungsteno fundido para protección y unión. Tiene una excelente resistencia al desgaste por abrasión y resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Se emplean en un proceso de pulverización supersónica (HVOF / HVAF). Sus propiedades se presentan en la Tabla 1-12.

**Tabla 1-12:** Propiedades de WC-CO12.

Fórmula	WC – 12CO
Producción tecnológica	Aglomerado y sinterizado
Tipo	88/12
Densidad aparente	4.3-4.8 Típicamente 4.5
Dureza	HV 1000/1200 Depósito de eficiencia 50-70%
Tamaño	5-30 µm 10-38 µm 15-45 µm 20-53 µm 45-90 µm
Contenido	WC: 87-89 Co: 11-13
Aplicación	HVOF, APS, HVAF WC (2-3 micron), WC 0.6 micrón. Recubrimientos duros y densos con buena resistencia a la abrasión, erosión, erosión y desgaste por deslizamiento. Recubrimientos lisos con microestructura fina y alta fuerza de unión Se utiliza para desgaste general, rollos de papel, equipos de trefilado, aspas de ventiladores y compresores, sellos y carcasas de bombas, piezas de máquinas, etc.

Fuente: (METALCN, 2020)

Realizado por: Autores

### 1.16. Concentración de sedimentos en el embalse

Los niveles de contaminación del Río Pastaza son de alta influencia en la vida útil de los rodets, puesto que el agua que ingresa a las turbinas contiene gran variedad de sedimentos y compuestos químicos arrojados al Río por fábricas, curtiembres e industria en general.

Según (Mora Sánchez, 2018, págs. 9-10), los sedimentos que ingresan a la toma de agua de San Francisco están formados por sólidos producto de desechos urbanos, material de naturaleza vegetal y mineral.

A pesar de que el caudal de agua es desarenado antes que este ingrese a la toma de Agoyán para evitar que sólidos en suspensión ingresen a la turbina, se pueden identificar pequeños sedimentos que se filtran hasta el sistema de turbina causando abrasión o erosión en sus partes hidráulicas provocando daños que tienen altos costos de reparación.

Según (Sancho Soria, 2019, págs. 51-53), tras tomar tomas de sedimentos en el desarenador de la represa de Agoyán y realizar un análisis químico y mineralógico se determinó que estos están compuestos por:

- Materia orgánica
- Cloruros
- Compuestos alcalinos
- Azufre
- Hierro
- Manganeseo
- Cobre
- Zinc
- Plomo

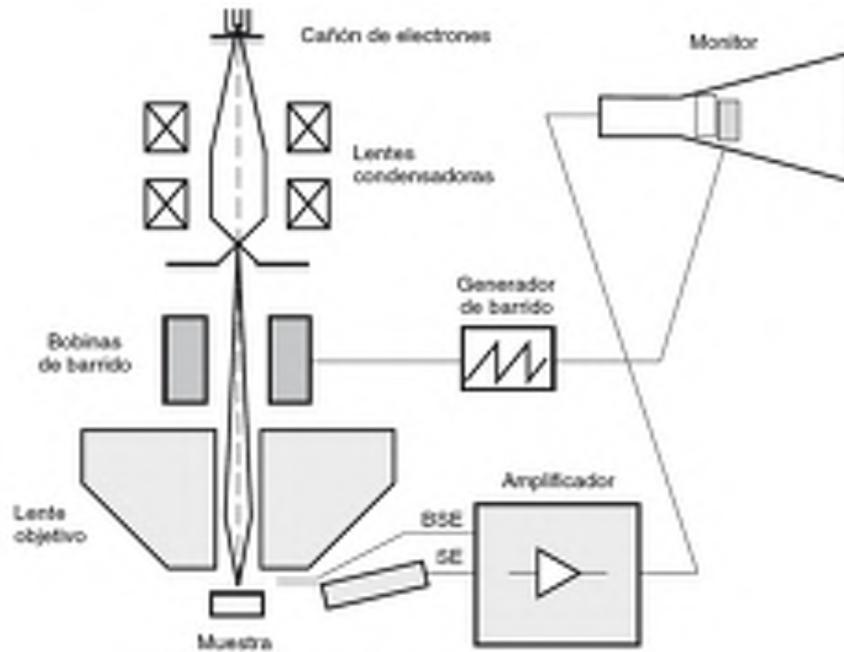
### **1.17. Microscopia electrónica de barrido**

La microscopia electrónica de barrido conocida como MEB o por sus siglas en inglés SEM (*Scanning Electron Microscope*), permite la caracterización superficial de una muestra, para ello utilizan un haz de electrones que son acelerados dentro de un campo con un alto potencial eléctrico (25000 voltios). Los electrones son emitidos con diferentes detectores, mismos que tras la interacción entre electrones – materia recogen después los electrones generados de la interacción para reproducir una imagen que muestra la estructura de la muestra, pudiendo dar información sobre la forma, textura, microestructura, composición química etc.

La técnica SEM posee una alta profundidad de campo, lo que permite realizar un barrido por toda la superficie de una muestra, permitiendo de esa manera generar imágenes en alta definición a diferentes magnificaciones.

El microscopio electrónico de barrido puede estar equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: un detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta

resolución SEI (*Secondary Electron Image*), un detector de electrones retro dispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (*Backscattered Electron Image*), y un detector de energía dispersiva EDS (*Energy Dispersive Spectrometer*), permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis e imágenes de distribución de elementos en superficies pulidas (ECURED, 2020). La Figura 1-20, nos muestra el esquema de cómo se encuentra representado el SEM con todos sus componentes,



**Figura 1-20:** Representación esquemática de un microscopio electrónico de barrido.

Realizado por: CIRT

### 1.17.1. Microscopio Zeiss EVO MA25

EVO (véase la Figura 1-21), es un microscopio electrónico de barrido de alta resolución utilizado para obtener el máximo detalle visual posible de un elemento en análisis.

Este microscopio tiene como su característica principal extraer datos en alta resolución sin producir alteraciones sobre la muestra manteniendo el estado original de la probeta gracias a su cámara de vacío.

Cuenta con 3 detectores:

- Rayos x
- Electrones retro dispersados

- Electrones secundarios



**Figura 1-21:** Microscopio SEM EVO MA 25.

**Realizado por:** (ZEISS, 2020)

El lente objetivo de rayos X proporciona una distancia de trabajo de 8.5 mm con un ángulo de inclinación de 35°. Trabaja recibiendo rayos X rebotados sobre cada uno de los puntos de la superficie de la probeta por los que pasó el haz de electrones. Cada elemento químico tiene una reacción diferente ante los rayos X, entregando información sobre cada uno de los puntos seleccionados en una determinada área (UPV, 2020).

El detector de electrones retro dispersados tiene una alta sensibilidad sobre el número atómico de los elementos que conforman la muestra en análisis, de tal manera que este detector analiza los cambios en la composición química presente (UPV, 2020).

El detector de electrones secundarios trabaja con electrones secundarios de energía baja ofreciendo mayor calidad y resolución en las imágenes que ésta muestra. Su característica principal es su alta sensibilidad ante la superficie de los materiales, razón por la cual es una excelente herramienta cuando de caracterizar superficialmente un material se trata. Su rendimiento se optimiza trabajando debajo de los 5000 kV razón por la cual se recomienda trabajar sobre probetas que no sean conductoras (UPV, 2020).

## **1.18. Paquetes informáticos**

### ***1.18.1. Solidworks***

Para la realización de este trabajo se utiliza *Solidworks* que es un software de tipo CAD que utiliza un entorno gráfico para la creación de croquis 2D, así como modelado, ensamble, simulación y gestión de elementos en 3D.

Al ser un software de tipo paramétrico, este permite realizar cambios en las dimensiones del modelo 3D tantas veces como sea necesario en el caso que este necesite ser modificado hasta obtener un resultado final definitivo.

Adicional a ello, *Solidworks* proporciona una vista realista de los modelos 3D, lo que será de gran ayuda para el desarrollo de esta investigación.

### ***1.18.2. Flow Simulation***

Es una de las librerías de *Solidworks* que ofrece la opción de solucionar problemas de Dinámica de Fluidos Computacional que aplica métodos de volúmenes finitos simulando de forma efectiva y rápida el flujo de un fluido en interacción con un determinado modelo 3D.

Dado que el software presenta una interfaz gráfica amigable con el usuario resulta conveniente su utilización para la configuración y preparación adecuada de los distintos escenarios de simulación preparados para la investigación.

## **1.19. Simulación numérica**

### ***1.19.1. Simulación por elementos finitos (FEA)***

Este método numérico consiste en tomar un determinado elemento y dividirlo en partes finitas pequeñas que representan un dominio del problema. Cada parte guarda una correlación con aquella que se encuentra en sus alrededores, es decir, cada elemento está unido por puntos (nodos), que en conjunto forman una malla. La precisión de la solución de la malla dependerá de la cantidad de nodos presentes en el elemento. Es decir, a mayor cantidad de partes finitas y nodos generados más preciso será el resultado del análisis. (Mirlisenna, 2016)

### ***1.19.2. Simulación por dinámica de fluidos computacional (CFD)***

El análisis *CFD* o dinámica de fluidos computacional utiliza modelos matemáticos computacionales combinados con métodos numéricos, que permiten evaluar el comportamiento de un conjunto de datos (físicos, dinámicos, estructurales, transferencia de calor, fluidos), para descubrir cómo interactúan entre ellos arrojando como resultado datos cercanos a los reales.

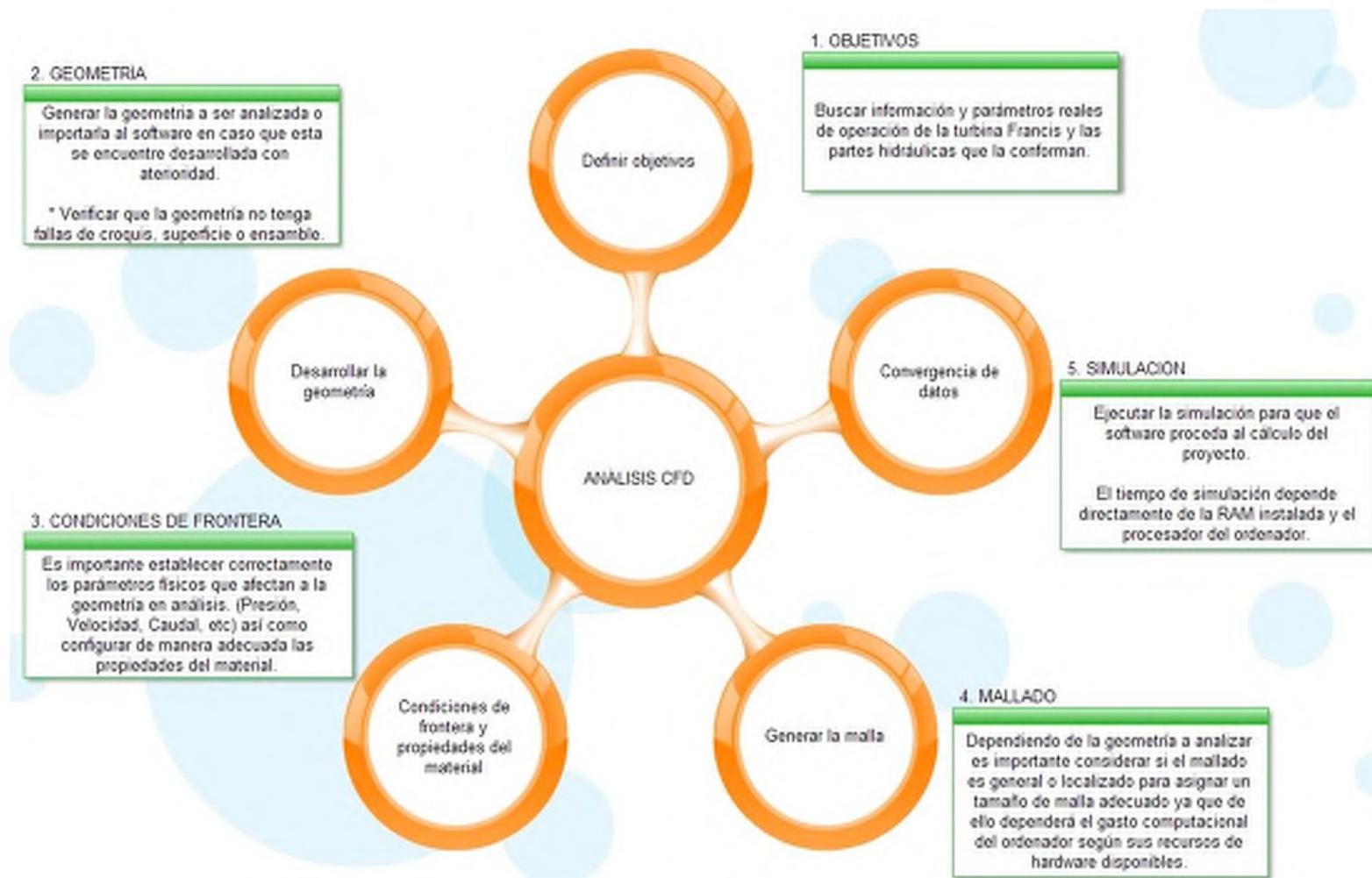
Correctamente utilizada y aplicada se convierte en una herramienta informática que brinda la ventaja de trabajar con modelos 2D y 3D, que pueden ser modificados para posteriormente comparar los resultados con los obtenidos en modelo real. Esto ayuda a interpretar y predecir el comportamiento del fluido cuando se encuentra sometido a determinadas condiciones de frontera.

En si la simulación por computador sigue un orden de pasos preestablecidos que deben cumplirse cuidadosamente para obtener resultados lógicos y satisfactorios.

En este caso de estudio se aprovecharán las características y potencia de la herramienta *Flow Simulation* de *Solidworks*, misma que facilita el análisis de escenarios complejos en el flujo de fluidos. Esta herramienta permite configurar correctamente el escenario sobre el cual se desenvuelve el fluido configurando desde las condiciones iniciales del modelo hasta controlar su comportamiento y evolución a través del tiempo.

De acuerdo con el Gráfico 1-1, la simulación del modelo planteado se resuelve de acuerdo con la siguiente secuencia:

1. Cada una de las ecuaciones diferenciales generadas en cada uno de los volúmenes de control se resuelve individualmente.
2. Los complejos sistemas de ecuaciones diferenciales se convierten en un sistema de ecuaciones de tipo algebraico.
3. Las ecuaciones integrales obtenidas son resueltas mediante iteraciones secuenciales.



**Gráfico 1-1:** Procedimiento para realizar una simulación correcta.

**Realizado por:** Autores

## **1.20. Turbulencia**

La turbulencia se presenta en la naturaleza y en algunas máquinas tecnológicas como un movimiento fluctuante desordenado que posee diversas escalas espaciales y temporales modificándolas de manera aleatoria, de tal manera que si se toma datos estadísticos de un mismo flujo turbulento se pueden obtener resultados diferentes (Richmond, 2019, pág. 4). Así mismo (Ballesteros Tajadura, 2018, pág. 2), manifiesta que a pesar de poder caracterizar a este fenómeno visualizando su flujo utilizando instrumentación adecuada y aplicando una resolución numérica de sus ecuaciones de constitución, aún no se ha conceptualizado por completo la teoría de la turbulencia.

Las ecuaciones de *Navier Stokes* y la ecuación de la continuidad entregan información como presión y velocidad del fluido que ayuda a describir y comprender su comportamiento. No obstante, para obtener más información es necesario involucrar más ecuaciones mismas que deben ser resueltas simultáneamente, tomando en cuenta que estas pueden variar en función del tiempo lo que complica su solución analítica lo que hace necesario el uso de un computador y paquetes de software adecuados.

### **1.20.1. Modelos de turbulencia**

Un régimen de carácter turbulento tiene como característica la presencia de vórtices, fuerzas de arrastre y fricción entre la capa límite y la superficie de contacto, así como el cambio repentino de su velocidad y presión, situación que vuelve complejo su estudio.

Una manera óptima que permite predecir el comportamiento de un flujo turbulento es la aplicación de la Simulación Numérica Directa DNS<sup>12</sup> considerando todas las escalas espaciales (disipativas y pequeñas) y resolviéndolas en una malla computacional. Según (Gómez González, 2017, pág. 42), la simulación DNS resulta inapropiada para flujos con geometría compleja o configuraciones de flujo.

## **1.21. Mallado**

Generar un mallado adecuado y de calidad sobre el modelo 3D a estudiar es el paso inicial del proceso de simulación, pues la calidad de este determina la rapidez de su resolución y los requerimientos computacionales que se requieran (Gómez González, 2017, pág. 47).

---

<sup>12</sup> Direct Numerical Simulation es un proceso de resolución directa de las ecuaciones de Navier Stokes mediante CFD sin considerar ningún modelo de turbulencia resolviendo todo el rango de escalas espaciales y temporales.

El mallado consiste en dividir el modelo de estudio en un finito número de volúmenes. El gasto computacional es inversamente proporcional al tamaño de malla y la complejidad del modelo, lo que significa que mientras más fina y detallada sea la malla, más precisos serán los resultados entregados por el software con un requerimiento computacional elevado del procesador.

Con el paso del tiempo se han desarrollado mejores algoritmos de generación de mallado para CFD, lo que mejora considerablemente la interconectividad de los nodos de sus celdas. Las mallas se pueden clasificar según su conectividad o por el tipo de elementos presentes.

### ***1.21.1. Según su conectividad***

#### *1.21.1.1. Malla estructurada*

De acuerdo con la Figura 1-22a, en este tipo de malla cada elemento tiene exactamente el mismo número de vecinos isomorfos colindantes, en cada vértice con excepción de las fronteras y su solución está definida por el método de diferencias finitas (García, Palacio, & García, 2009, pág. 20).

Posee una aplicación simple con bajos requerimientos computacionales y excelentes resultados permite configurar a voluntad la forma y tamaño de sus elementos.

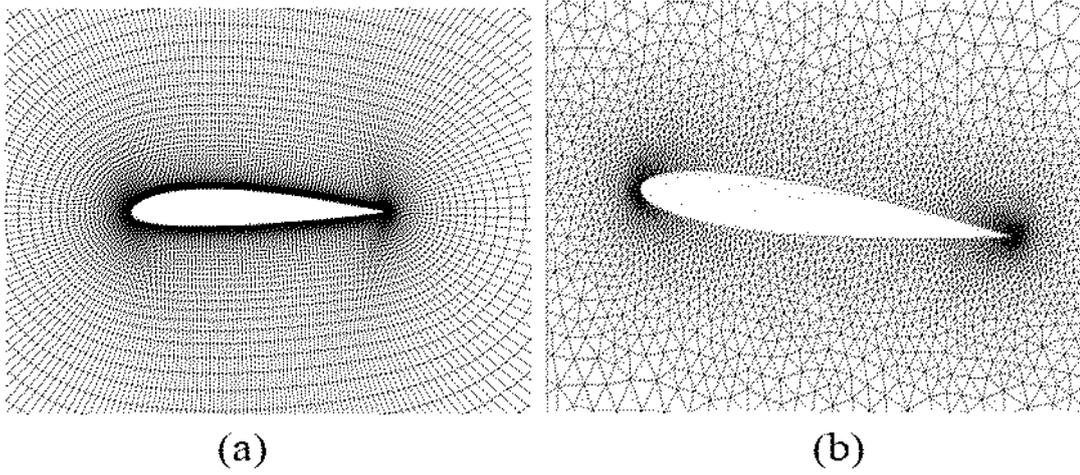
(Mora Sánchez, 2018, pág. 41), señala que para estudios que involucren fenómenos de cavitación es recomendable utilizar una malla de tipo estructurada puesto que esta permite una refinación de su tamaño.

#### *1.21.1.2. Malla no estructurada*

Observando la Figura 1-22b, esta malla posee diferente número de elementos vecinos en su periferia. Su metodología de solución se basa en elementos finitos, lo que significa una ventaja al permitir refinar el mallado en zonas específicas de geometría compleja sin perder exactitud en los resultados del cálculo.

La malla no estructurada requiere seleccionar vértices de los nodos y su triangulación con el fin de poder resolver finos detalles en la geometría seleccionada, además de contar también con elementos grandes en su dominio que reduzcan el número de nodos totales.

Para casos similares a este estudio (Ruiz Diaz & López, 2016, pág. 43), sugiere generar una malla fina en las zonas donde el fluido presente cambios repentinos de sus propiedades. En el caso del rodete Francis estos gradientes de velocidad y presión se presentan en los bordes de ataque y salida de los álabes del rodete.



**Figura 1-22:** Tipos de mallado a) Estructurada. b) No estructurada.

**Realizado por:** (Gómez González, 2017, págs. 48-49)

## 2. CAPITULO II: MARCO METODOLÓGICO

### 2.1. Herramientas de experimentación

El presente capítulo tratará el procedimiento de la investigación, misma que consta de la obtención de información necesaria, así como la verificación de los diferentes parámetros a utilizar para realizar la simulación objetivo. Se efectuará un ensayo de espectrometría al metal base y capa de metalizado para conocer la composición química y propiedades mecánicas en la zona de convergencia de los dos materiales cuando estos han sido sometidos a un proceso de desgaste por cavitación. De igual manera se realizarán observaciones en el SEM para conocer la morfología superficial del álabe del rodete, información necesaria para recrear un escenario óptimo de simulación.

### 2.2. Obtención de la muestra

Para conocer la composición y morfología del material, se ha tomado una muestra de los álabes extraídos del rodete de la unidad 1 de San Francisco, mismos que reposan en las instalaciones del CIRT.

#### 2.2.1. Selección del álabe objeto de estudio

Para obtener información que aporte en esta investigación, se inspeccionaron a detalle, cada uno de estos álabes, en busca de un elemento que contenga daños superficiales representativos, especialmente el desprendimiento parcial de la capa de metalizado.



**Figura 2-1:** Inspección de daños en los álabes del rodete de la unidad 1 de San Francisco.

Realizado por: Autores

#### 2.2.2. Obtención de la probeta objeto de estudio

Tras examinar detalladamente cada uno de los álabes como se observa en la Figura 2-1, se extrajo una porción de álabe mediante corte manual con la finalidad de evitar la alteración de la estructura interna de la muestra.

Para obtener resultados fiables se debe llevar a cabo una limpieza adecuada de la superficie a ensayar, con el objetivo de remover toda suciedad presente debido a que la muestra puede contener en su superficie partículas producto del proceso de corte.

De este proceso de corte indicado en la Figura 2-2 y Figura 2-3 se obtuvo una probeta que presente las condiciones ideales para su estudio.

Para este procedimiento se utiliza la norma (ASTM E3-11), que establece los parámetros necesarios para obtener el corte de una probeta de una manera correcta sin alterar su microestructura.



**Figura 2-2:** Obtención de la probeta principal al cortar el álabe número 4.

**Realizado por:** Autores



**Figura 2-3:** Probeta obtenida mediante corte manual para el análisis en SEM.

**Realizado por:** Autores

### 2.3. Análisis de la morfología de la probeta mediante SEM

Con el uso del SEM se logra observar micrométricamente con detalle la zona de convergencia del material base con la capa de metalizado, su espesor, la morfología del perfil de anclaje y la distancia existente entre sus picos y valles.

Para el uso del microscopio y la respectiva toma de imágenes se tomó en cuenta el procedimiento a seguir indicado en el manual del fabricante del equipo, así como también se contó con el asesoramiento del personal encargado del laboratorio de análisis de fallas del CIRT.

El proceso se detalla a continuación:

- a) Limpieza. - La superficie de la muestra debe ser limpiada correctamente para liberarla de cualquier tipo de impurezas presentes que afecten el análisis. Se empleó agua y cepillo de cerdas plásticas.
- b) Secado. - Se sumerge la probeta en alcohol para posteriormente secarla utilizando aire comprimido.
- c) Adaptar la probeta en el porta muestras. - Seleccionar el porta-muestra en el que mejor se adapte la probeta para sujetarla fijamente, una sujeción adecuada se lo realiza con llave hexagonal ubicando la probeta como se indica en la Figura 2-4.



**Figura 2-4:** Probeta sujeta en el porta muestras.

**Realizado por:** Autores

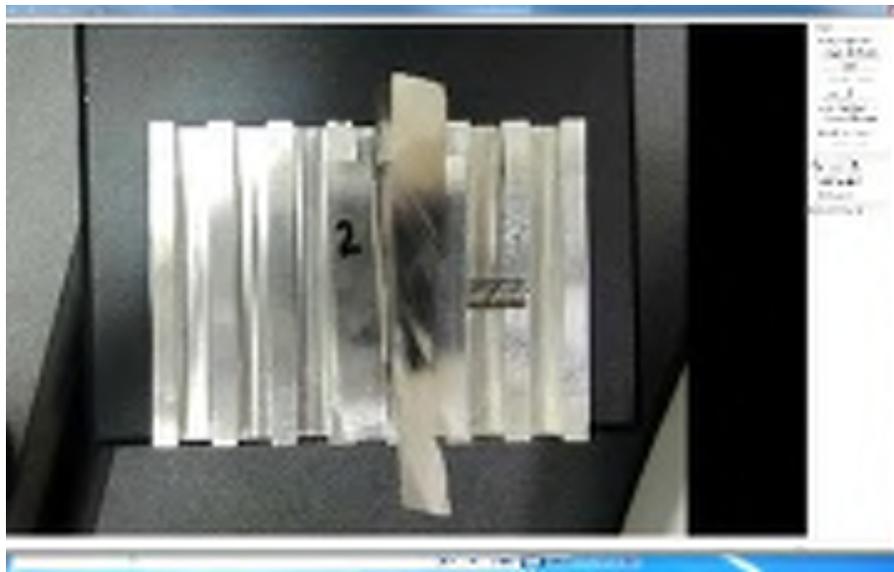
- d) Fotografiar la superficie de estudio. - Se toma una fotografía con la cámara ubicada junto al microscopio (véase Figura 2-5) sin alterar la distancia vertical previamente configurada en la torreta de sujeción. Se emplea una cámara CANON EOS Réflex.



**Figura 2-5:** Cámara CANON EOS Réflex sujeta en torreta de laboratorio de análisis de fallas.

**Realizado por:** Autores

- e) Importar la fotografía. – En la Figura 2-6 se puede observar cómo la fotografía se importará con ayuda del software *SmartSEM* en el Microscopio EVO MA25.



**Figura 2-6:** Imagen importada mediante *SmartSEM*.

**Realizado por:** Autores

- f) Ingresar la probeta a la cámara del SEM. - Se introduce la probeta en el microscopio con precaución de no tocar la cámara o los detectores (véase Figura 2-7).



**Figura 2-7:** Introducción de la probeta en el microscopio.

**Realizado por:** Autores

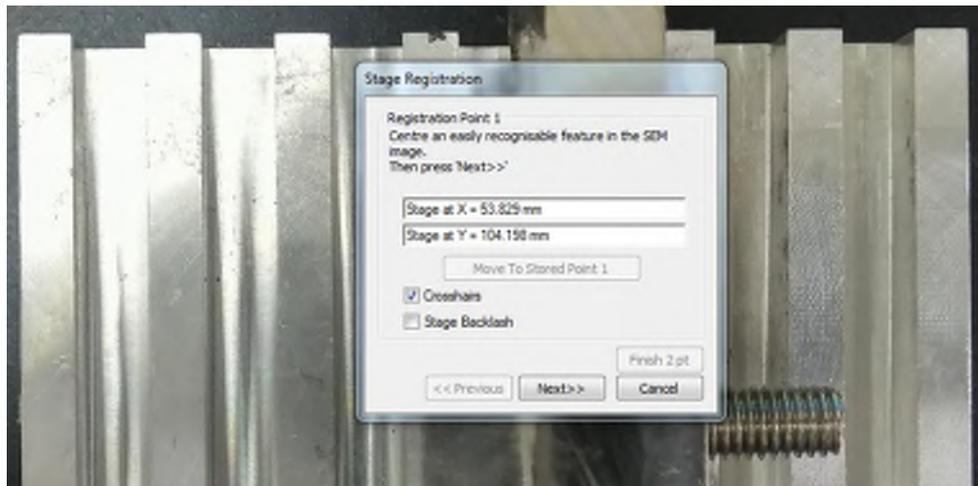
- g) Posicionamiento de la muestra. – En la Figura 2-8, utilizando la cámara interna del SEM se posiciona la probeta en un lugar adecuado.



**Figura 2-8:** Posicionamiento de la probeta.

**Realizado por:** Autores

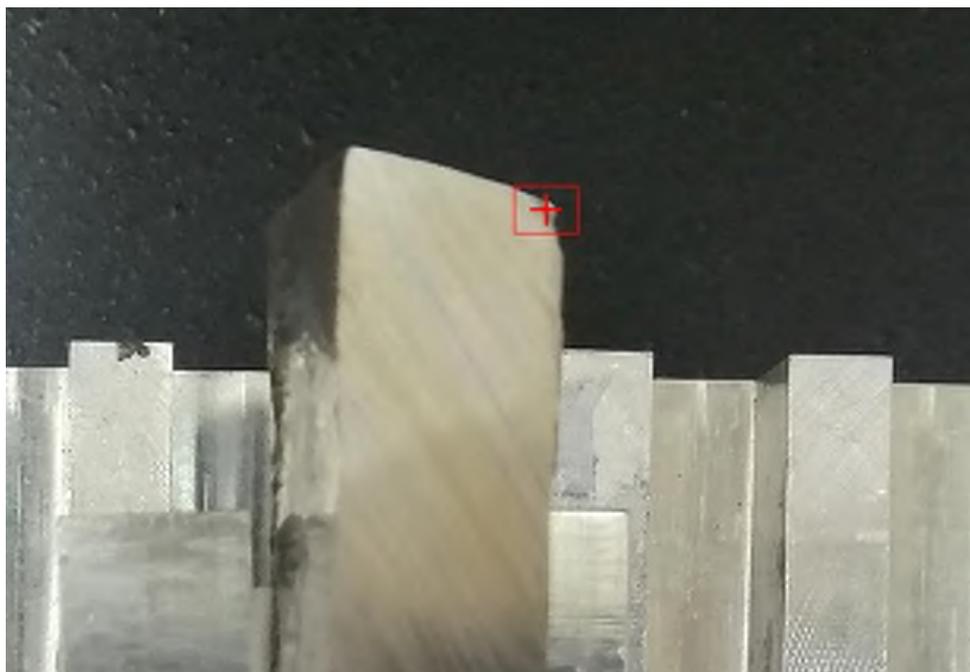
- h) Despresurizar la cámara y establecer parámetros de trabajo. - Se procede a despresurizar la cámara del SEM, hasta que alcance una presión de vacío. Se emplea el software *SmartSEM* para dicho proceso.
- i) Correlación. - Se establecen puntos de referencia sobre la imagen y la probeta utilizando la opción “*Image Navigation*” dentro del software tal como se indica en la Figura 2-9.



**Figura 2-9:** Proceso de correlación.

**Realizado por:** Autores

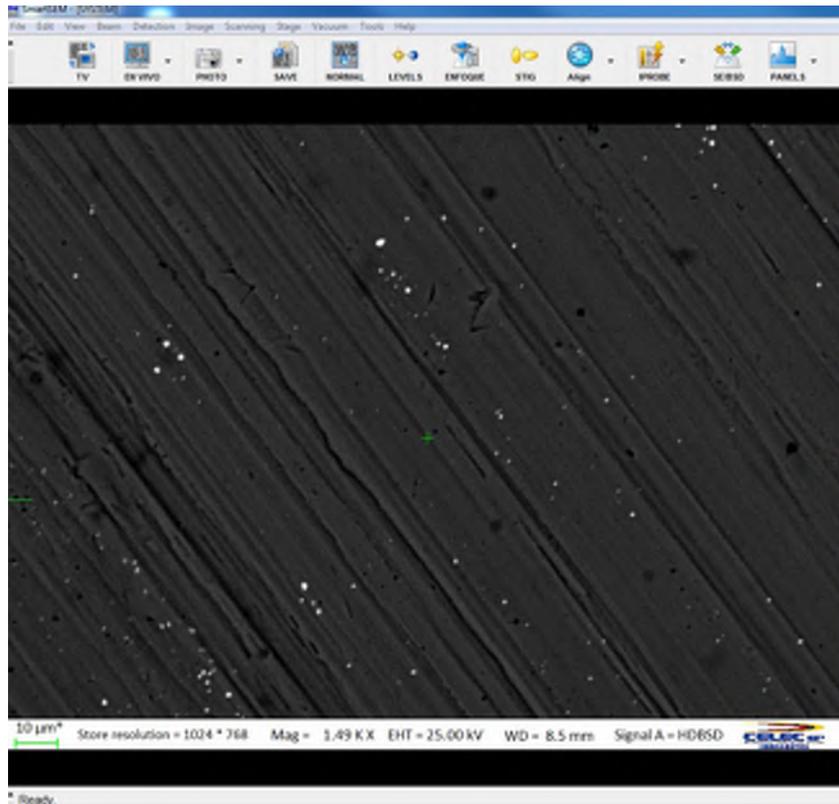
- j) Comprobar la correlación. - Seleccionar puntos reconocibles en la fotografía, para comprobar que el microscopio dirija su posición hacia el punto seleccionado (véase Figura 2-10).



**Figura 2-10:** Comprobación de la correlación

**Realizado por:** Autores

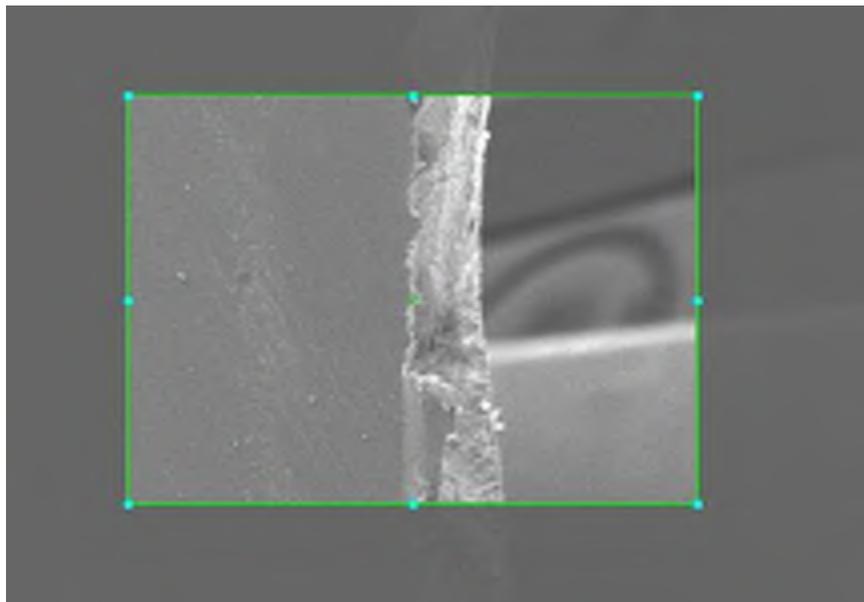
- k) Barrido. - Con ayuda de la fotografía se barre la superficie de la probeta para buscar áreas específicas de análisis como se indica en la Figura 2-11.



**Figura 2-11:** Barrido de la superficie.

**Realizado por:** Autores

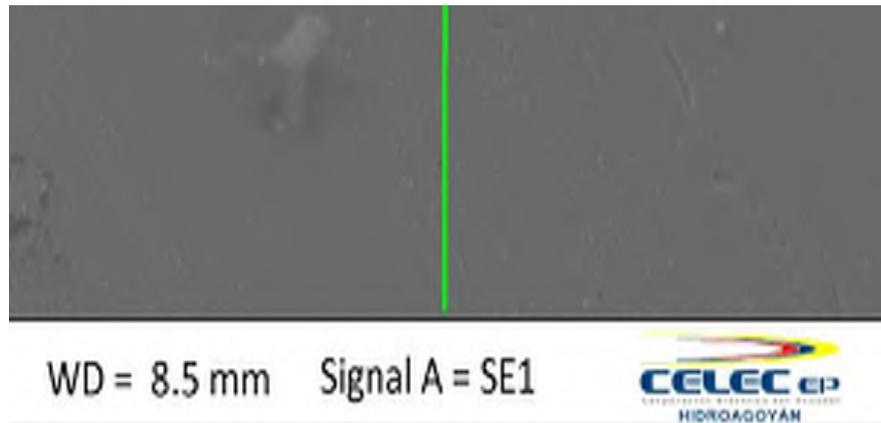
- 1) Ajustes en la zona de interés. - Con ayuda de los controles ópticos se realizan ajustes ópticos sobre la zona de estudio, magnificando, enfocando y aclarando la imagen como se indica en la Figura 2-12.



**Figura 2-12:** Búsqueda de zonas de interés para análisis.

**Realizado por:** Autores

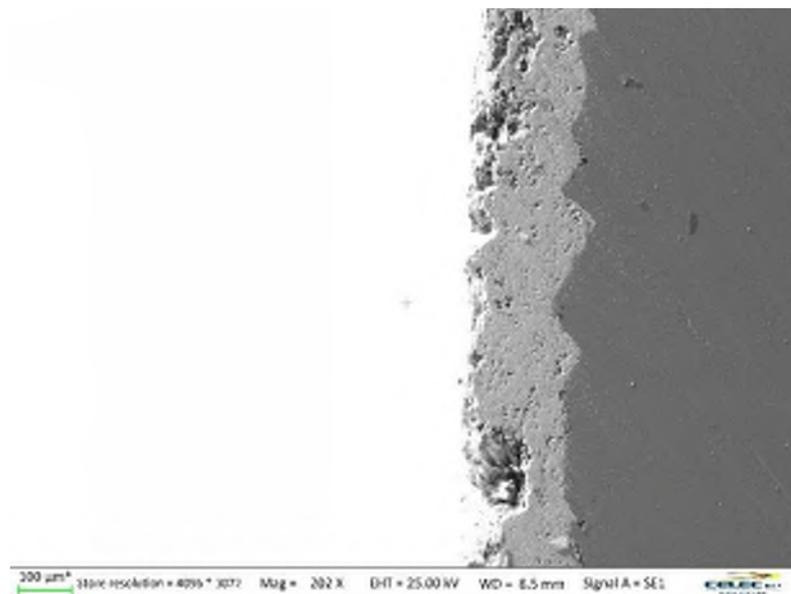
- m) Posicionamiento. - Se recomienda posicionar la muestra a una distancia de trabajo de 8,5 mm (véase Figura 2-13).



**Figura 2-13:** Posicionamiento de la probeta a una distancia de trabajo de 8,5 mm.

Realizado por: Autores

- n) Imagen de barrido. – Finalmente en la Figura 2-14 se procede a obtener la imagen deseada con una distancia óptima en la que se puedan obtener datos de distancias y espesores de la capa de metalizado.



**Figura 2-14:** Imagen obtenida de la interfaz entre la capa de metalizado y el metal base.

Realizado por: Autores

#### 2.4. Obtención de los modelos geométricos de elementos para el análisis.

Para este estudio se trabajó con tres modelos geométricos:

- Turbina Francis perteneciente a la Central Hidroeléctrica San Francisco.

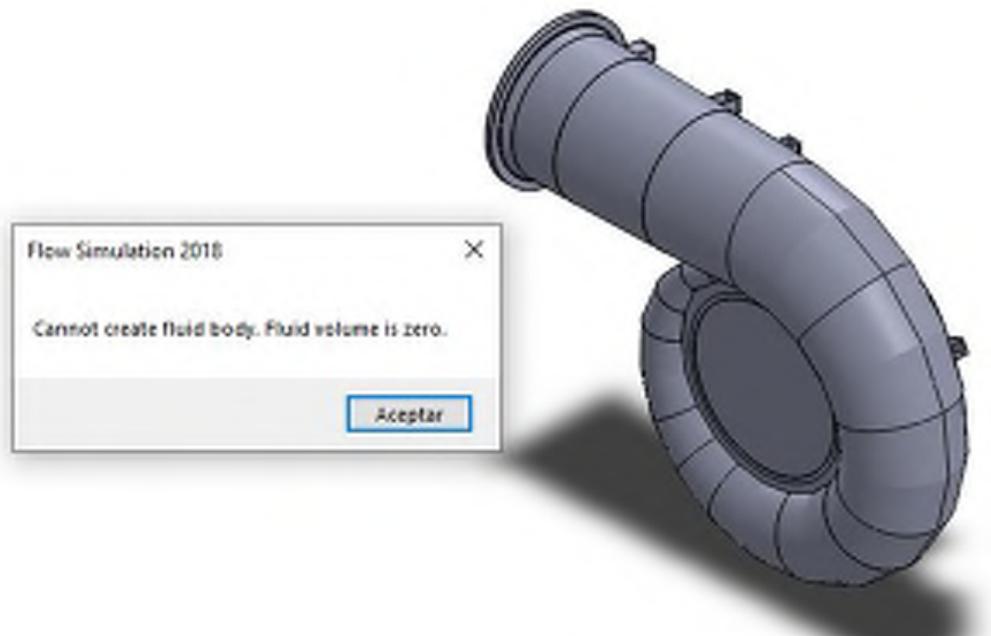
- Probeta obtenida del álabe del rodete de la turbina Francis de la Central Hidroeléctrica San Francisco sin presencia de desgaste superficial.
- Probeta obtenida del álabe del rodete de la turbina Francis de la Central Hidroeléctrica San Francisco con presencia de desgaste superficial en su capa de metalizado y metal base.

#### 2.4.1. Turbina Francis

Se procedió analizar los planos y archivos previamente escaneados de sólidos existentes de los elementos que forman la turbina Francis, tales como caracol, predistribuidor, álabes directrices, rodete Francis para iniciar un proceso de verificación de posibles fallas de construcción, tales como grietas internas o aristas perdidas sin conexión.

##### 2.4.1.1. Hermeticidad del sistema

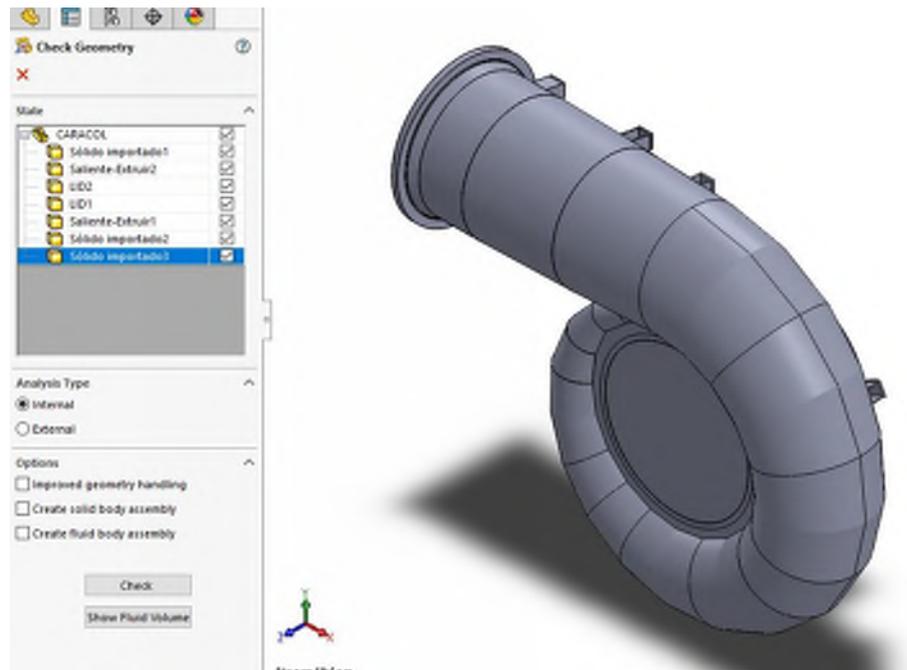
Para una correcta simulación es necesario que el sistema sea hermético, es decir, que no existan puntos o aristas por los cuales se produzcan fugas del fluido, caso contrario *Solidworks* advertirá que el modelo presenta problemas que deben ser revisados y corregidos, así como lo indica la Figura 2-15.



**Figura 2-15:** Advertencia del software indicando que no es posible generar un volumen.

Realizado por: Autores

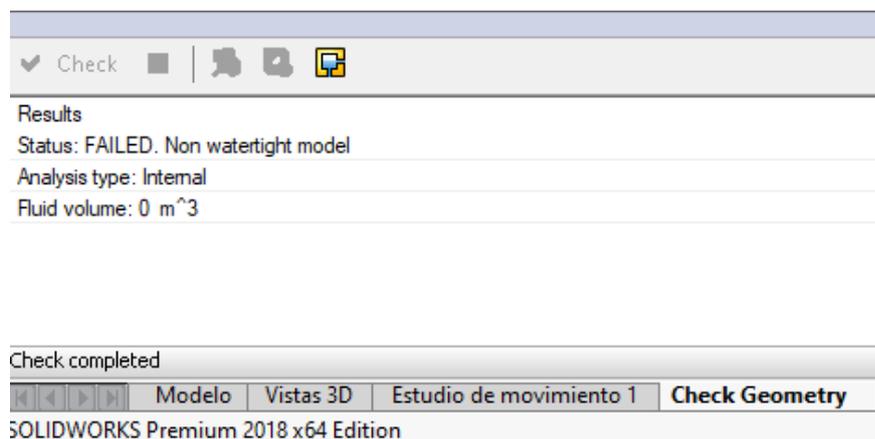
Se probó la hermeticidad del caracol y pre distribuidor con la herramienta “*check geometry*” que *Solidworks Flow Simulation* ofrece, obteniendo como resultado que estos elementos no son herméticos debido a la presencia de cavidades internas y aristas sin conexión



**Figura 2-16:** Verificación de hermeticidad sobre el conjunto caracol – pre distribuidor.

**Realizado por:** Autores

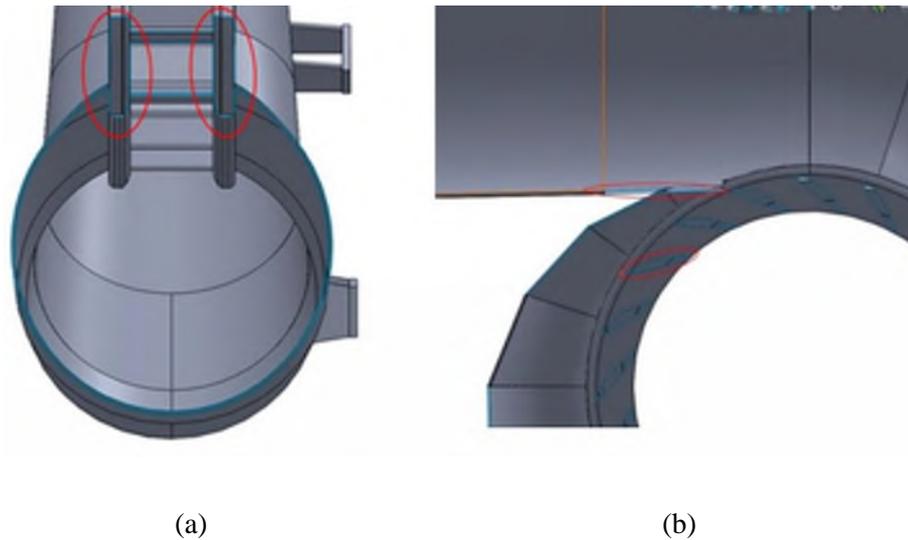
Una vez realizado el análisis el software detectó la no hermeticidad del conjunto (Figura 2-16 y Figura 2-17), lo que no permitirá que el flujo encuentre una ruta a seguir hasta que se solucione la presencia de fugas internas presentes en el sólido.



**Figura 2-17:** Resultado del proceso de *check geometry*.

**Fuente:** Autores

Para detectar estas fallas de manera visual se realizaron cortes transversales a cada uno de los elementos de la turbina con el fin de identificar las zonas en las que se encuentren estos problemas de construcción.



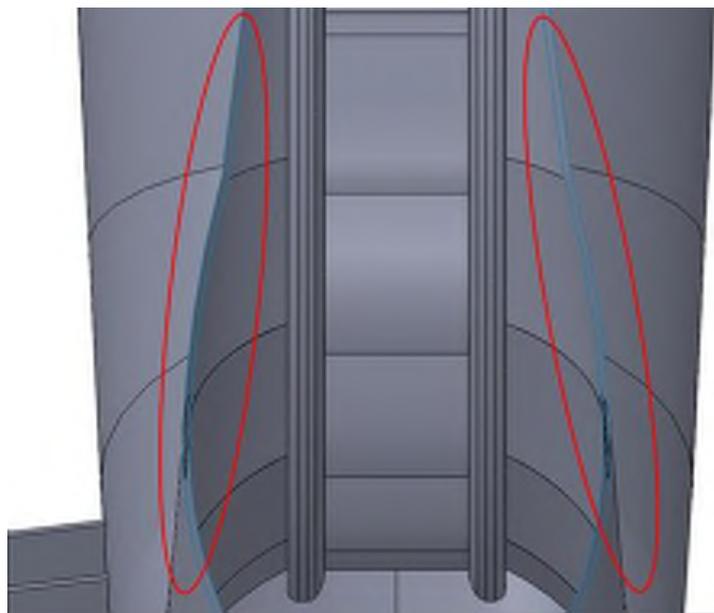
**Figura 2-18:** Cortes transversales para visualización de fallas. a) Anillos del predistribuidor b) Álabes fijos del predistribuidor.

**Realizado por:** Autores

Las fallas encontradas en estos modelos permiten observar cavidades internas de grandes proporciones que no permiten que el modelo sea hermético (véase Figura 2-18 y Figura 2-19).

Por ello se procede a realizar la reconstrucción de estos sólidos basándose en las planimetrías originales de los elementos hidráulicos de la turbina Francis.

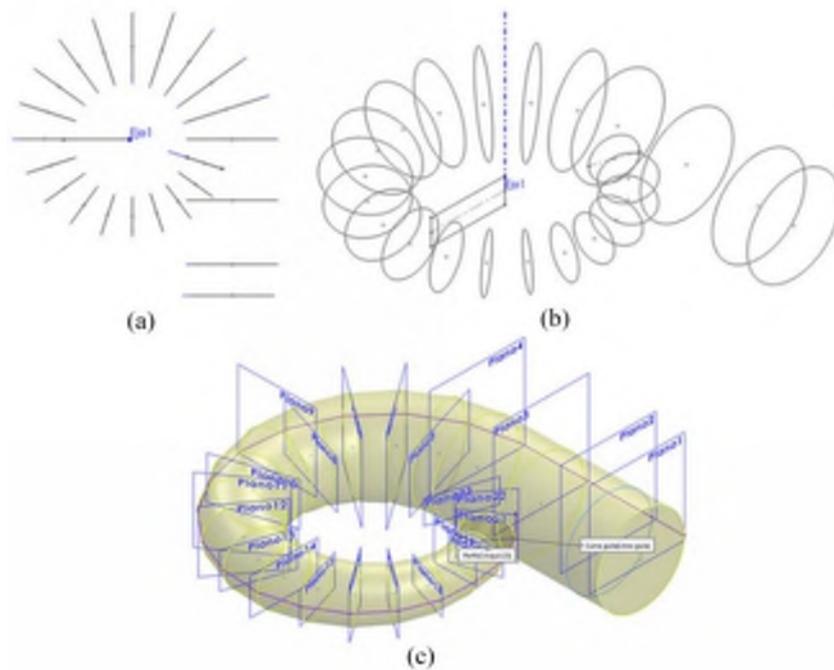
#### 2.4.1.2. Modelado del caracol



**Figura 2-19:** Cavidades detectadas en las paredes del caracol.

**Realizado por:** Autores

El modelado del caracol se basó en los planos existentes que reposan en los archivos del CIRT respetando una relación de 1 a 1 en todas sus dimensiones como se indica en la Figura 2-20.

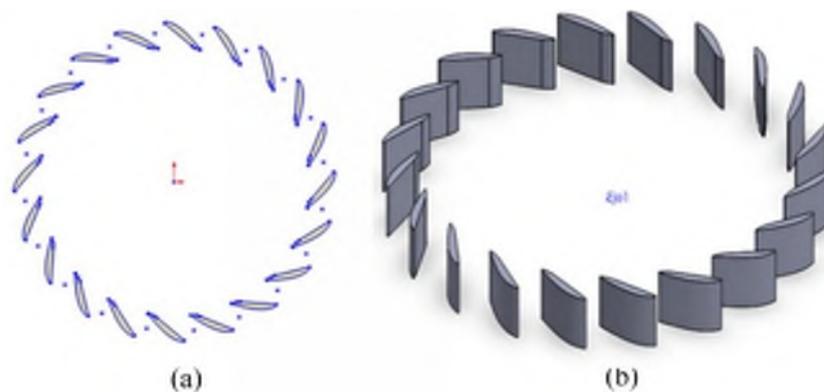


**Figura 2-20:** a) Generación de planos concéntricos. b) Croquizado de secciones circulares. c) Generación del sólido por barrido.

Realizado por: Autores

#### 2.4.1.3. Modelado del predistribuidor

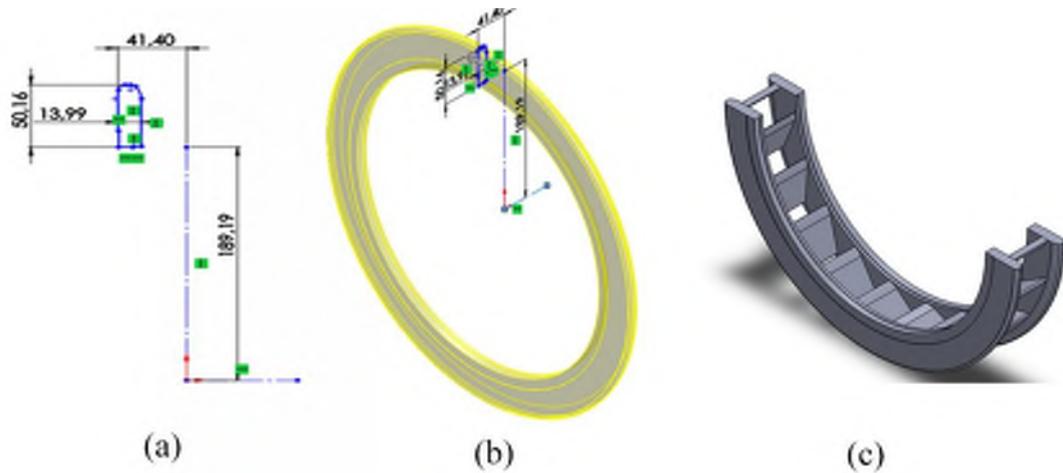
El predistribuidor se construyó utilizando los planos existentes e indicados en el Anexo 4 respetando sus medidas originales y obteniendo su modelo 3D como lo indica la Figura 2-21.



**Figura 2-21:** Croquizado de álabes fijos del predistribuidor. a) Croquizado del perfil hidráulico de álabes fijos. b) Modelado 3D de álabes fijos.

Realizado por: Autores

De igual manera se generaron los demás elementos como el predistribuidor (Figura 2-22 y Figura 2-23), para una vez que estén listos unirlos mediante una operación de ensamble.



**Figura 2-22:** Croquizado del predistribuidor. a) Croquis de los anillos. b) Generación del anillo por operación de revolución. c) Sólido 3D del predistribuidor.

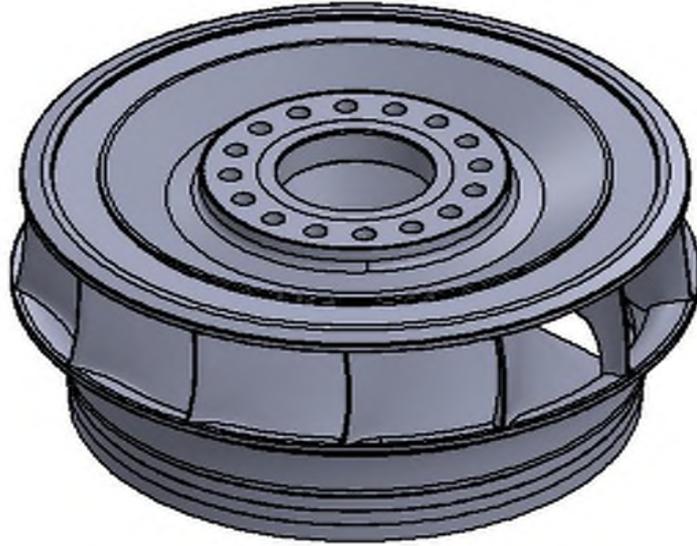
**Realizado por:** Autores



**Figura 2-23:** Vista superior del conjunto de álabes directrices de la turbina.

**Realizado por:** Autores

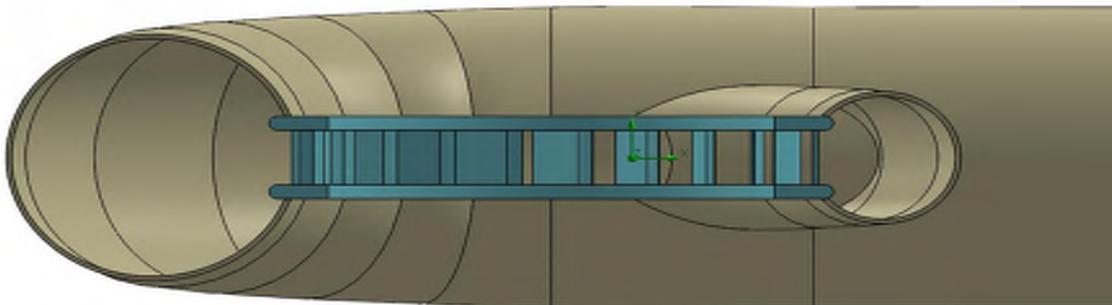
Para el modelo geométrico del rodete se utilizó el sólido generado mediante procesos de escaneo 3D por el departamento de ingeniería del CIRT, mismo que posee las mismas dimensiones que el rodete original. A fin de corregir errores de geometría se utilizaron los planos del rodete facilitados por el CIRT e indicados en el Anexo C.



**Figura 2-24:** Rodete tipo Francis obtenido mediante proceso de escaneo 3D

**Realizado por:** Autores

El sólido 3D del rodete (véase Figura 2-24), obtenido mediante un proceso de ingeniería inversa por el CIRT no sufrió cambios en su modelo geométrico interno, tan solo se generaron *lids*<sup>13</sup> en su parte superior e inferior para asegurar la hermeticidad del elemento.

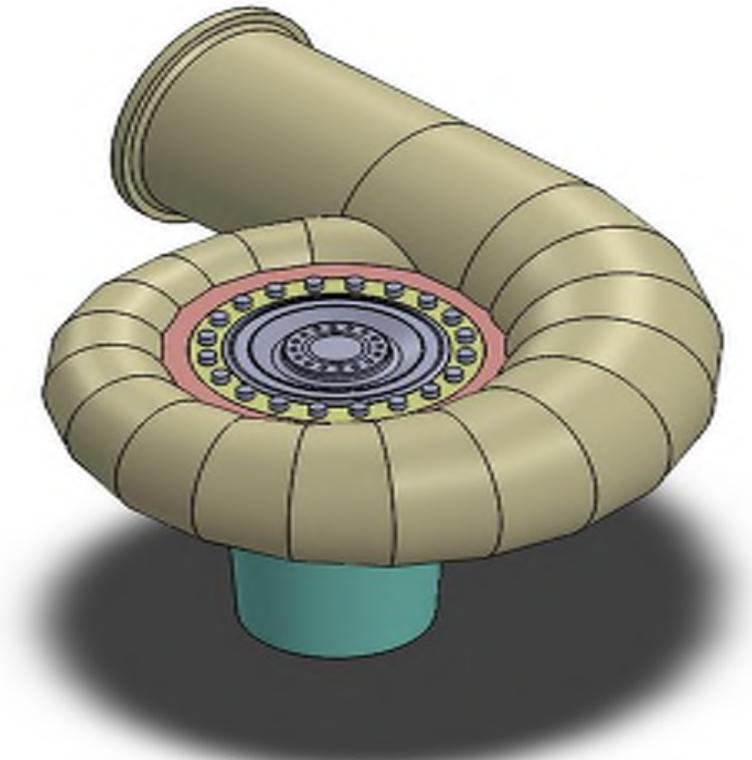


**Figura 2-25:** Vista en corte del modelo 3D del caracol y predistribuidor ensamblados.

**Realizado por:** Autores

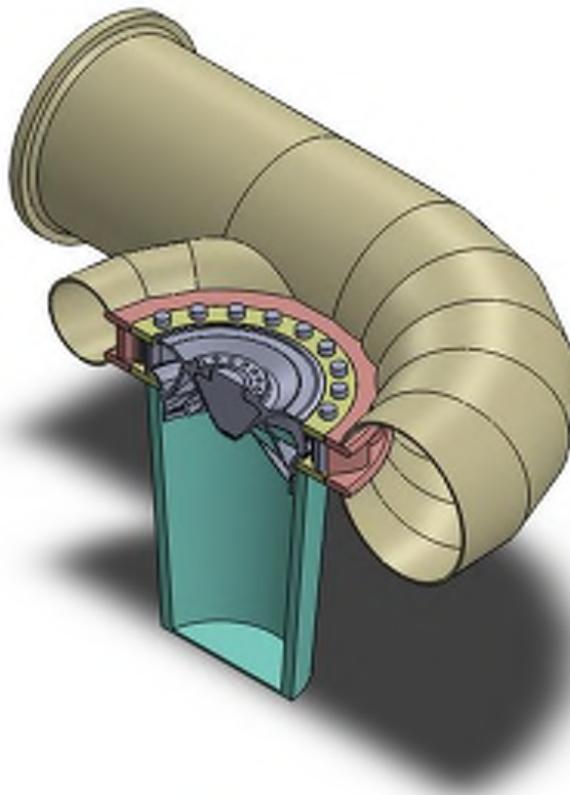
---

<sup>13</sup> Tapas o taponos que *SolidWorks* genera sobre agujeros de un modelo 3D para de esta manera asegurar la hermeticidad del sistema evitando posibles fugas del fluido.



**Figura 2-26:** Vista isométrica del conjunto de la turbina Francis.

Realizado por: Autores



**Figura 2-27:** Vista isométrica en corte de la turbina Francis.

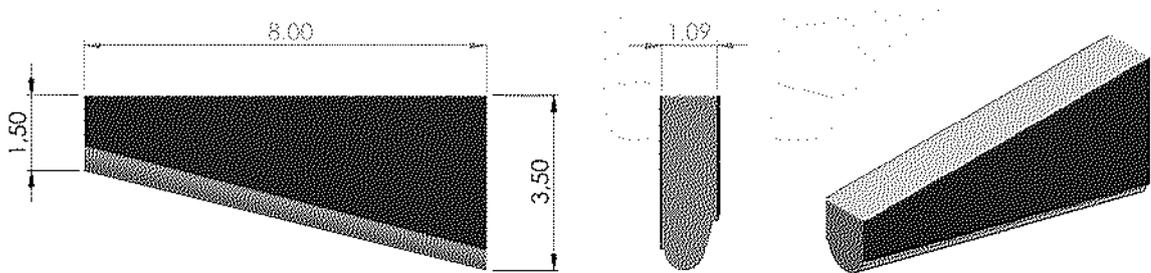
Realizado por: Autores

La Figura 2-25, Figura 2-26 y Figura 2-27 permiten observar secuencialmente el ensamble de la turbina, desde el subensamble del caracol con el predistribuidor hasta las vistas completas del sistema de turbina con todos sus elementos hidráulicos presentes

#### 2.4.2. Modelado de la probeta para el análisis

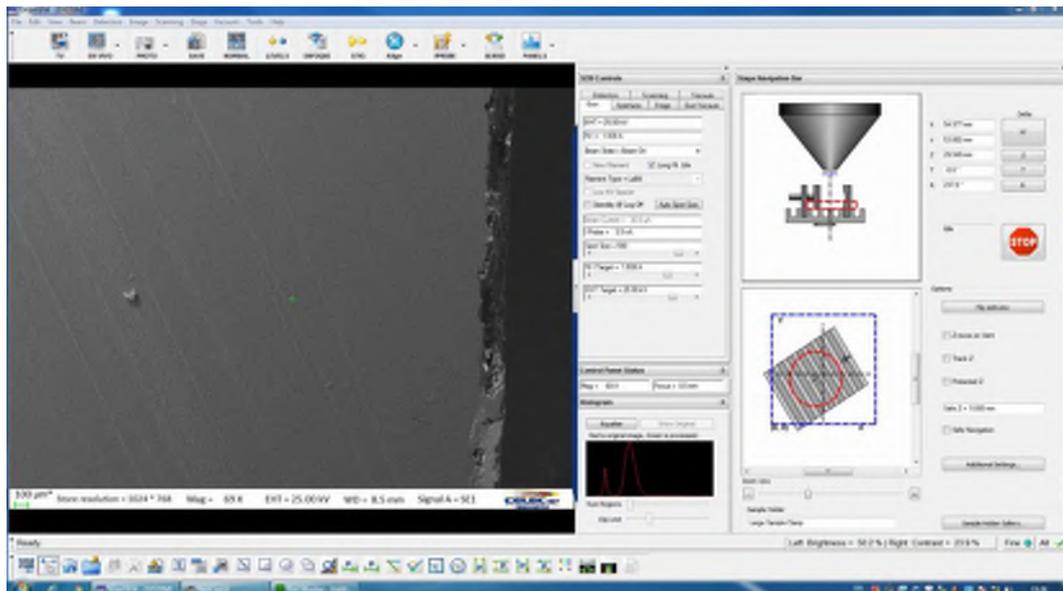
Para obtener la geometría de la probeta se realizó un estudio microscópico con el SEM del laboratorio de análisis de fallas del CIRT, con el que se logró detectar, señalar y fotografiar el perfil de anclaje del metal base de la probeta, así como los perfiles exteriores de la capa de metalizado en medida real.

El objetivo principal de este procedimiento es el escalar el análisis desde un entorno macro (Turbina Francis), a un estudio micro sobre una probeta con detalles visibles al microscopio en el orden de las micras. El corte de la probeta se indica en la Figura 2-28:



**Figura 2-28:** Dimensiones de la probeta en centímetros.

Realizado por: Autores



**Figura 2-29:** Estudio del perfil de anclaje y dimensiones de la capa de metalizado en el SEM

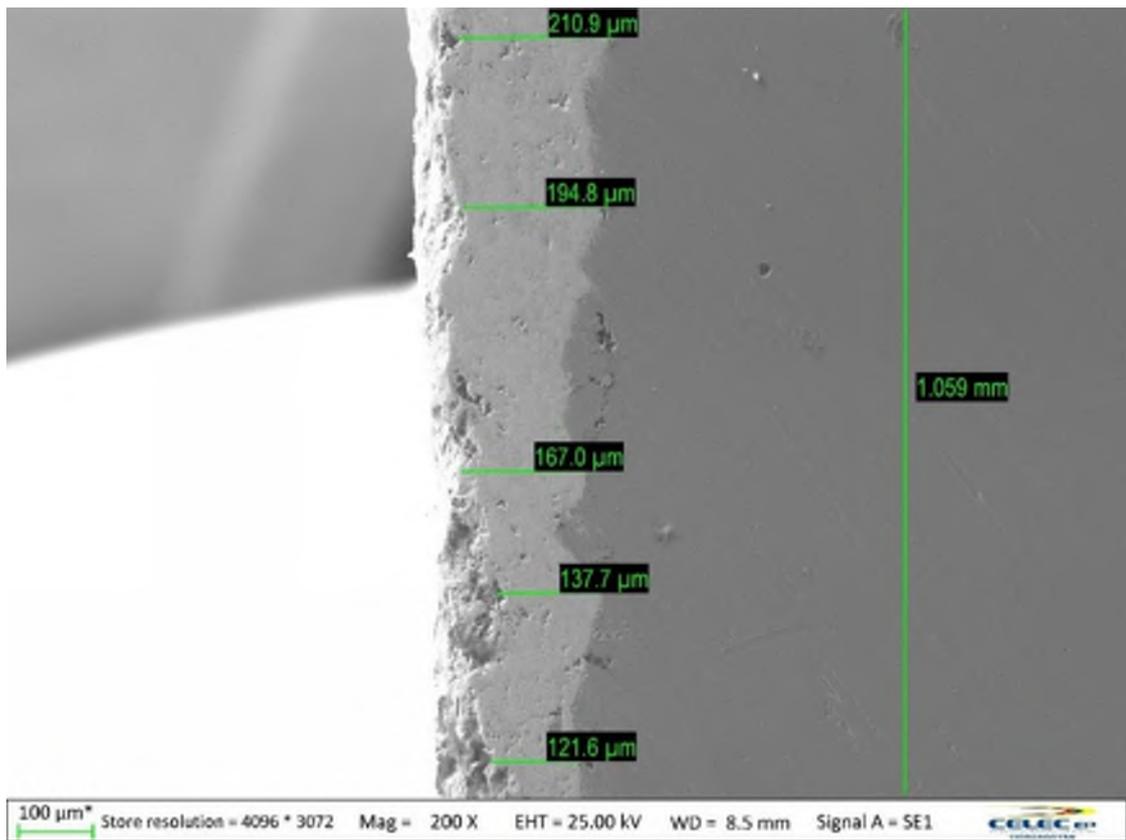
Realizado por: Autores

#### 2.4.2.1. Modelado de la probeta sin desgaste superficial

##### 2.4.2.1.1. Croquizado del perfil de anclaje

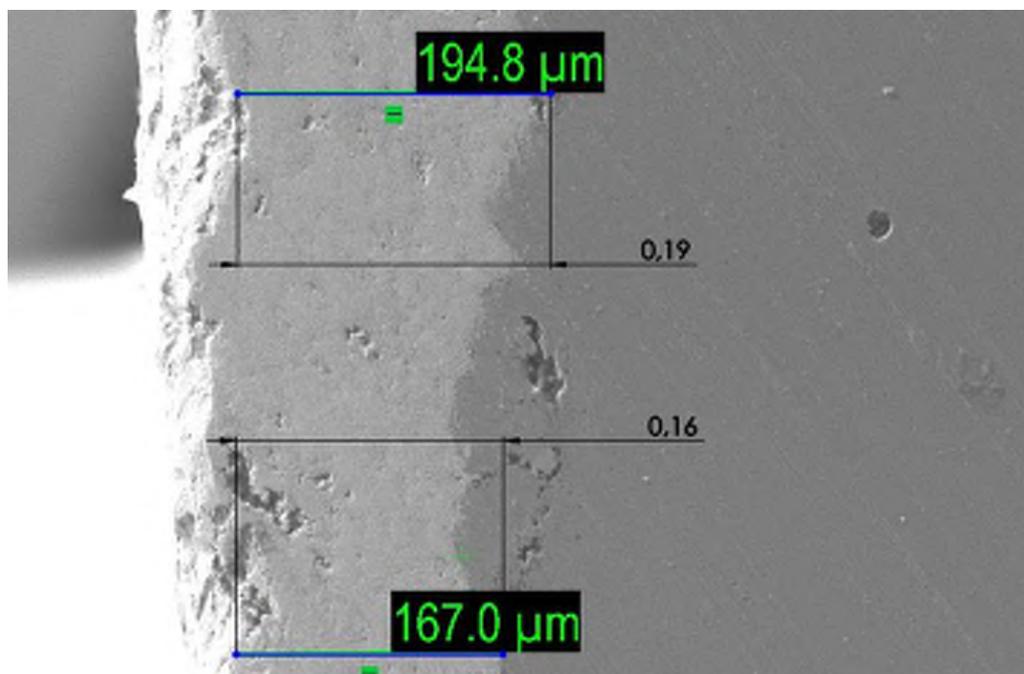
Para obtener el croquis del perfil de anclaje nos ayudamos del software Solidworks y las fotografías a tamaño real obtenidas con el SEM (véase Figura 2-29) siguiendo el siguiente procedimiento:

- 1) Generar un nuevo croquis sobre el plano superior en Solidworks.
- 2) Para escalar correctamente la imagen es necesario tomar una de las medidas obtenidas en el SEM, véase la Figura 2-30.
- 3) En este caso la altura de la fotografía de nuestro tramo de probeta obtenido en el SEM es de 1.059 mm.
- 4) Se importa la imagen obtenida en el SEM con la herramienta Imagen de croquis.
- 5) Ahora se procede a escalar la imagen modificando los valores del cuadro de propiedades de la imagen.
- 6) La imagen tiene una altura predeterminada de 3072 mm como lo indica la Figura 2-31, valor que será reemplazado por 1.059 mm como nueva altura para lograr escalar la imagen a tamaño real de microscopio.
- 7) Una vez aceptados los cambios el software escalara automáticamente la otra dimensión de la imagen.
- 8) Comprobamos que estas medidas coincidan con las obtenidas en el SEM dibujando una línea de croquis sobre las cotas de la imagen tal como se indica en el Figura 2-31 y comprobando que la imagen ha sido escalada correctamente.
- 9) Ahora con la ayuda de la herramienta spline, se procede a dibujar el perfil de anclaje mostrado en la imagen realizando un rasterizado o vectorizado sobre ella como lo detalla la Figura 2-32, Figura 2-33.
- 10) Este proceso se repite tantas veces como tantas imágenes del perfil de anclaje se obtuvieron en el SEM hasta cubrir toda la superficie del metal base de la probeta.
- 11) Para obtener el perfil externo de la capa de metalizado se repite los pasos 9 y 10. Cabe recordar que el perfil interno de la capa de metalizado coincide con el del perfil de anclaje.
- 12) El tiempo que tarda este proceso es directamente proporcional a la magnificación de la imagen. Una imagen con mayor magnificación será más clara, pero contendrá menor información por lo que será necesario croquizar un mayor número de imágenes obtenidas en el SEM hasta completar los 800 mm de longitud del metal base.



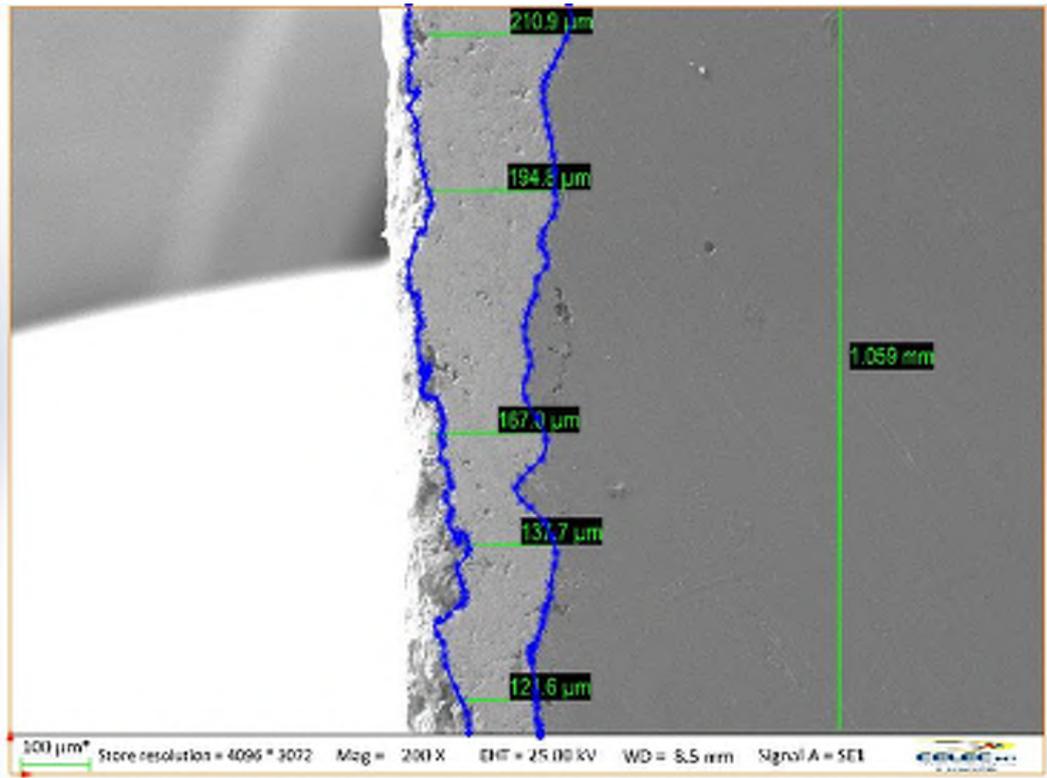
**Figura 2-30:** Dimensiones de longitud obtenidas en el SEM.

**Realizado por:** Autores



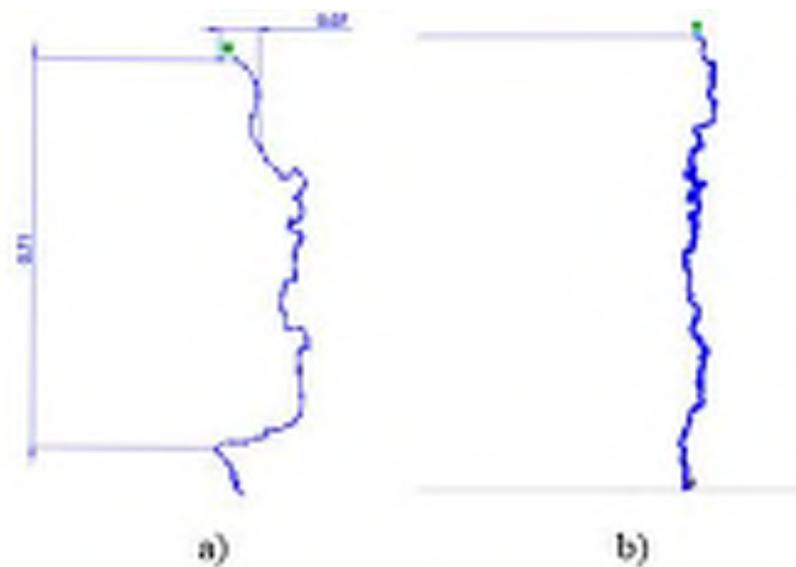
**Figura 2-31:** Verificación dimensional de la imagen obtenida en el SEM con la importada a *Solidworks*.

**Realizado por:** Autores



**Figura 2-32:** Proceso de vectorizado sobre el perfil de anclaje y capa de metalizado de una porción de 1 mm de la probeta.

Realizado por: Autores



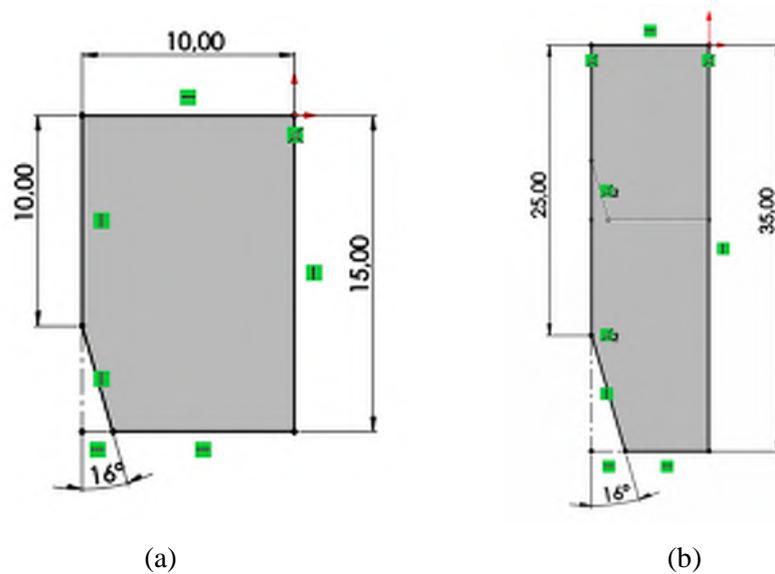
**Figura 2-33:** Croquis del perfil de anclaje. a) Segmento de 0.71 mm b) Vista ampliada.

Realizado por: Autores

#### 2.4.2.1.2. Croquizado y modelado del metal base

El metal base de la probeta fue modelado basándose en sus dimensiones reales indicadas en la Figura 2-34 mediante el siguiente procedimiento:

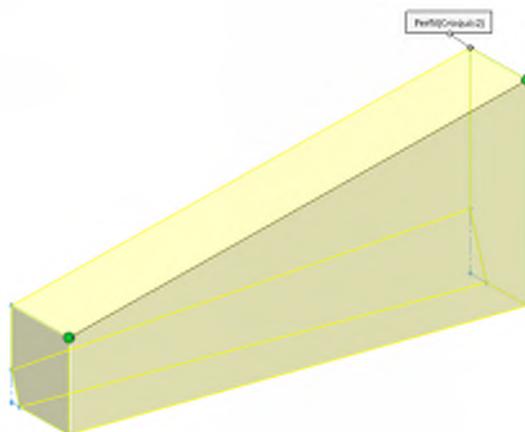
- 1) Croquizar sus caras frontales y posterior respetando la distancia que las separa como se indica en la Figura 2-34.



**Figura 2-34:** Croquizado del sólido de metal base. a) Vista frontal. b) Vista posterior.

Realizado por: Autores

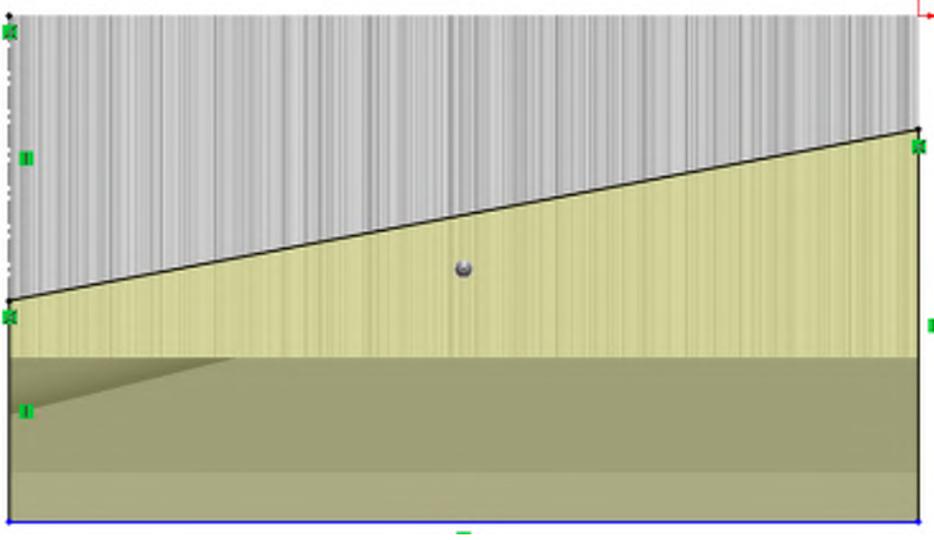
- 2) Se realiza una operación de recubrimiento (véase Figura 2-35) con los croquis obtenidos para generar el 3D del metal base y se aplica un redondeo de cara triple en la parte inferior del modelado para obtener características geométricas similares al modelo real.



**Figura 2-35:** Modelado del metal base mediante operación de recubrimiento.

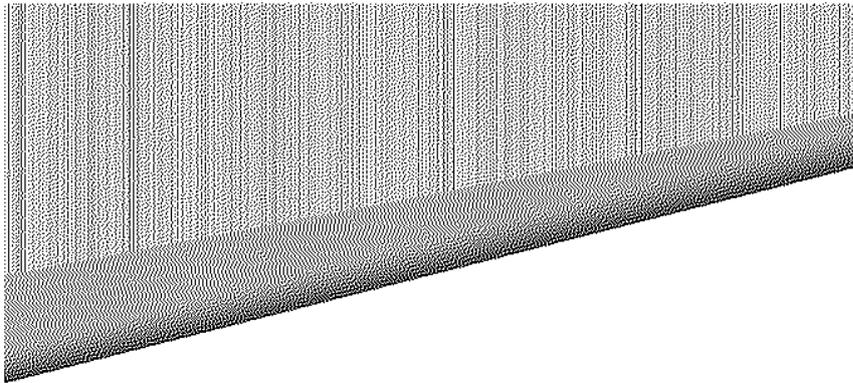
Realizado por: Autores

- 3) Sobre la vista superior del modelado en sus extremos derecho e izquierdo se realiza un nuevo croquis y se traslada el croquis del perfil de anclaje obtenido previamente, se verifica que este no contenga errores de construcción y se procede a extruirlo hasta cubrir la totalidad de la cara lateral del metal base. Los excesos de extrusión serán retirados con una operación de corte como se observa en la Figura 2-36 y Figura 2-37.



**Figura 2-36:** Operación de corte - extruir para retirar los excesos de material.

**Realizado por:** Autores

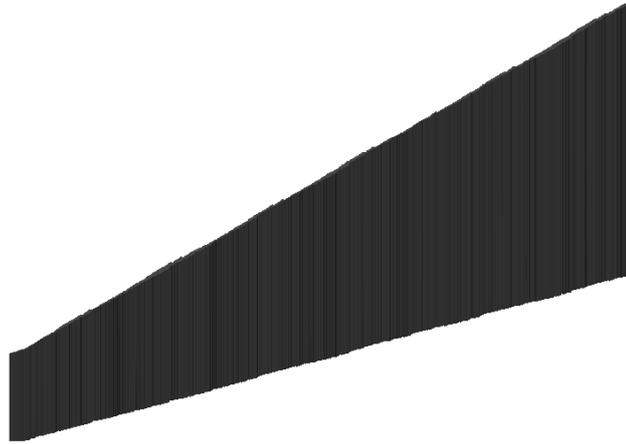


**Figura 2-37:** Vista lateral del lado de succión del metal base.

**Realizado por:** Autores

#### *2.4.2.1.3. Croquizado de las capas de metalizado*

Para la obtención de las capas de metalizado tanto del lado de presión como el de lado de succión, es necesario obtener sus perfiles externos mediante el mismo proceso por el cual se obtuvo el croquis del perfil de anclaje (véase Figura 2-38).



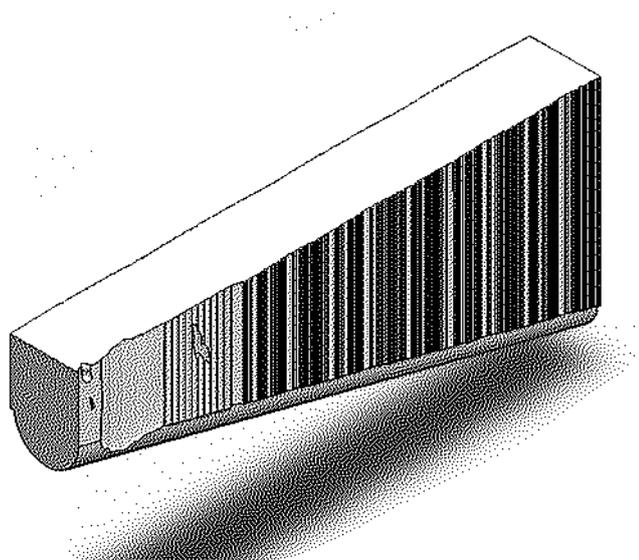
**Figura 2-38:** Capa de metalizado del lado de presión.

Realizado por: Autores

Es sumamente importante asignarle a la capa de metalizado las propiedades indicadas en la Tabla 1-10 para el carburo de tungsteno.

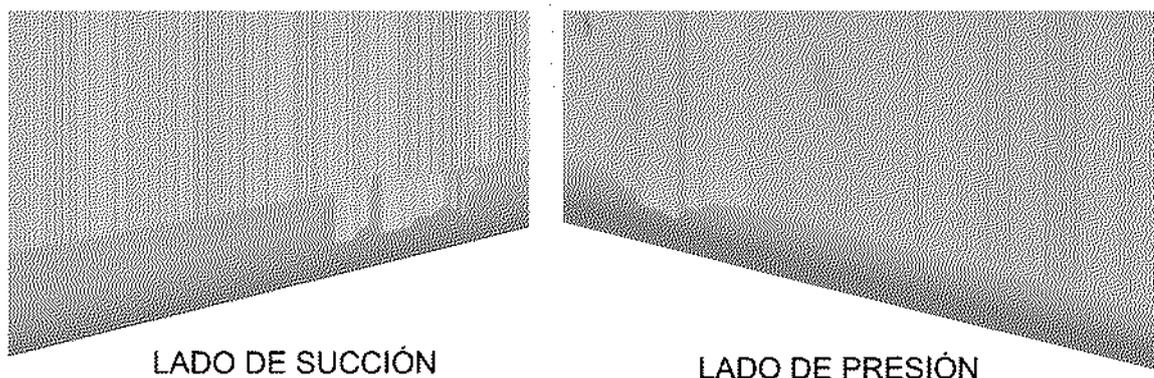
#### 2.4.2.2. Modelado de la probeta con desgaste superficial.

Para obtener el modelo 3D del metal base con zonas de desgaste sobre su superficie nos ayudamos de la primera probeta obtenida para realizar sobre ella algunos procesos de corte, corte barrido, corte revolución etc., que permitan generar una apariencia de desgaste y erosión sobre su superficie (véase Figura 2-39 y Figura 2-40).



**Figura 2-39:** Vistas isométrica del metal base con desgaste superficial en el lado de presión.

Realizado por: Autores



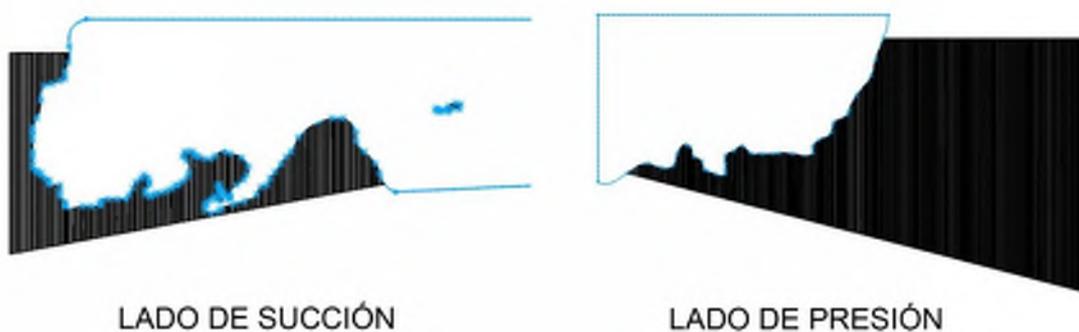
**Figura 2-40:** Detalles del desgaste superficial sobre el metal base.

**Realizado por:** Autores

#### 2.4.2.2.1. Modelado de las capas de metalizado con desgaste superficial.

Para modelar las capas de metalizado se realiza el siguiente proceso:

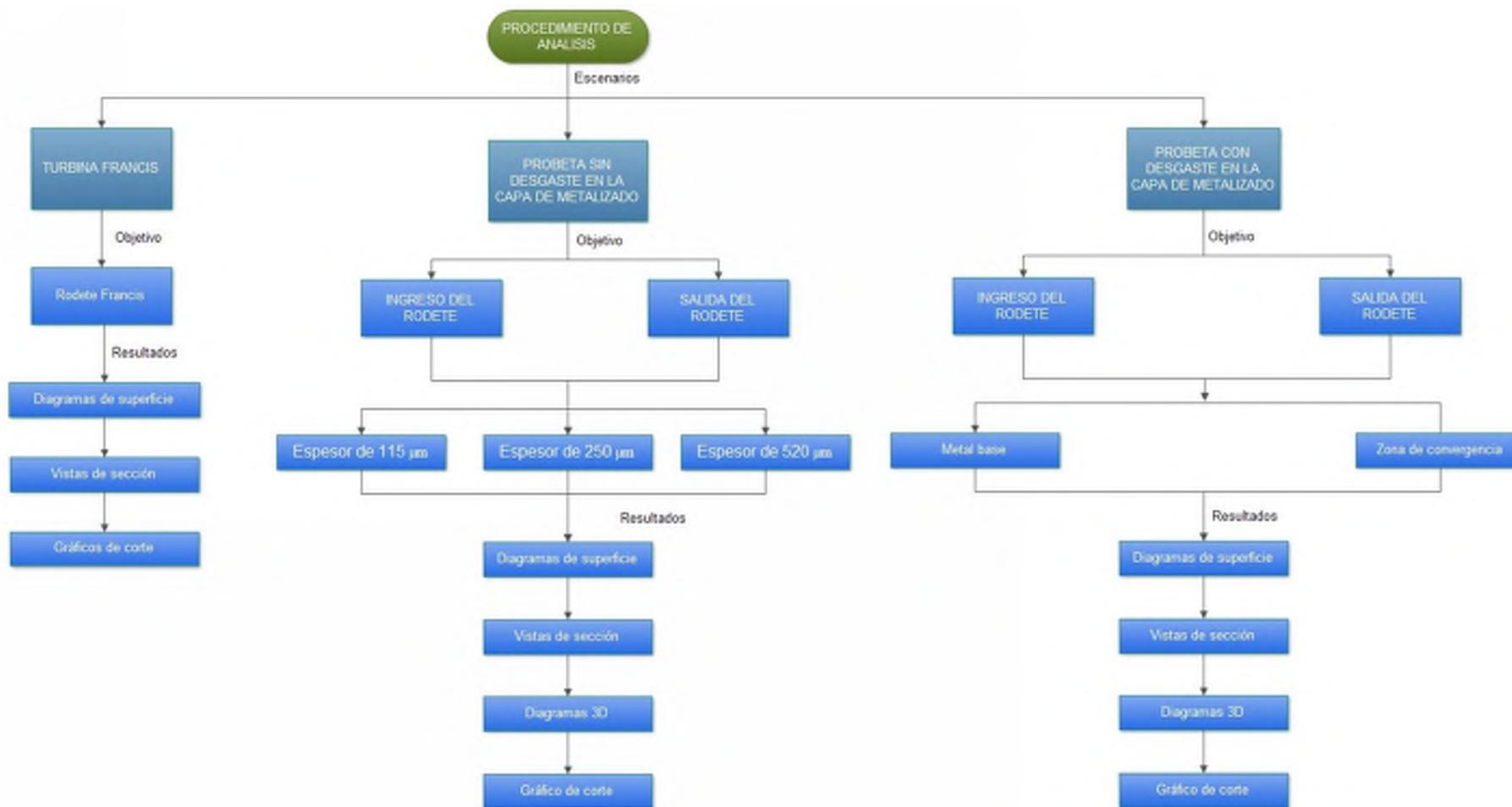
- 1) Se utilizan los modelos de croquis de perfil de anclaje y borde de metalizado obtenidos previamente.
- 2) Se genera un plano paralelo que contenga un croquis con un contorno similar al de la probeta real.
- 3) Se realiza una operación de corte extruir, para generar el corte y la apariencia deseada (véase Figura 2-41).



**Figura 2-41:** Croquis generado sobre el metalizado para brindar una apariencia de desgaste

**Realizado por:** Autores

## 2.5. Procedimiento de análisis



**Gráfico 2-1:** Procedimiento planteado para el análisis.

**Realizado por:** Autores

### 2.5.1. Configuración de los parámetros de simulación.

Como primer paso de un proceso de simulación se debe insertar correctamente cada uno de los parámetros físicos a los que se encuentra sometido el fluido. Para ello se utiliza el asistente de proyecto de Flow Simulation que permite introducir estos parámetros de una manera secuencial, ordenada y correcta.

### 2.5.2. Recursos computacionales

Los cálculos fueron realizados en un ordenador con las características indicadas en la Tabla 2-1.

**Tabla 2-1:** Recursos de hardware del ordenador.

Procesador	Intel Core i7 9700 K – 3.60 GHz
Memoria RAM	16 GB DDR4
Almacenamiento	256 GB
Gráfico	AMD Radeón RX5600 XT

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

### 2.5.3. Parámetros de operación de la turbina Francis

La Tabla 2-2, indica a detalle los parámetros de simulación utilizados para la turbina Francis.

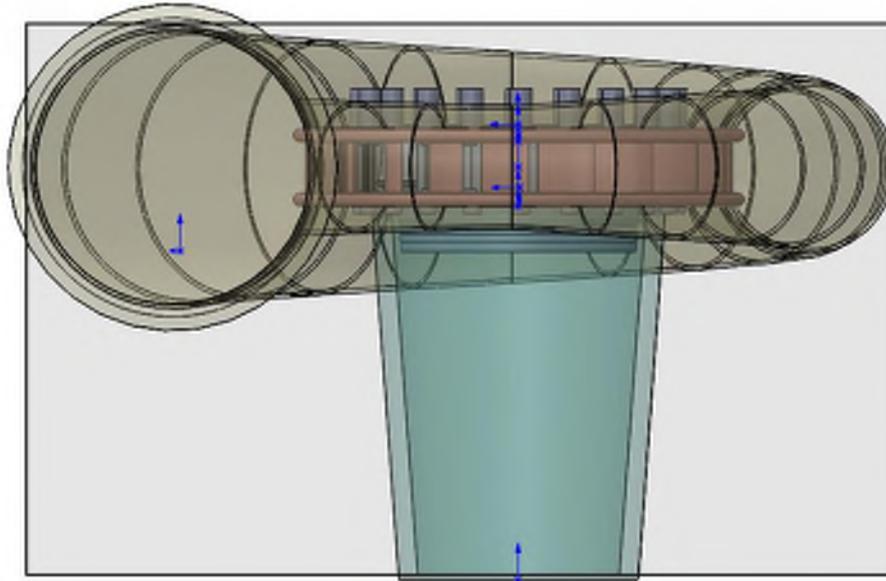
**Tabla 2-2:** Parámetros de simulación de la Turbina Francis.

Parámetro	Valor
Sistema de unidades	Sistema internacional
Presión del fluido	2133655.96 [Pa]
Gravedad	9.777 m/s <sup>2</sup>
Fluido de trabajo	Agua
Tipo de flujo	Turbulento
Condiciones de la pared	Adiabática
Temperatura del fluido	16 °C
Velocidad del fluido	8.205 m/s
Eje de entrada del fluido	-z
Turbulencia	5%

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

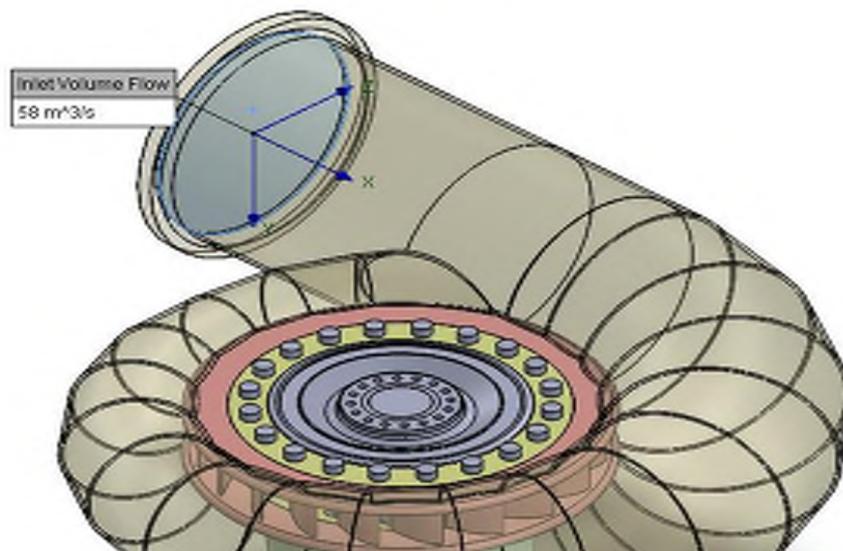
### 2.5.3.1. Dominio computacional de la turbina Francis



**Figura 2-42:** Selección del dominio computacional con límites que van desde la zona de succión de la turbina hasta la zona de descarga.

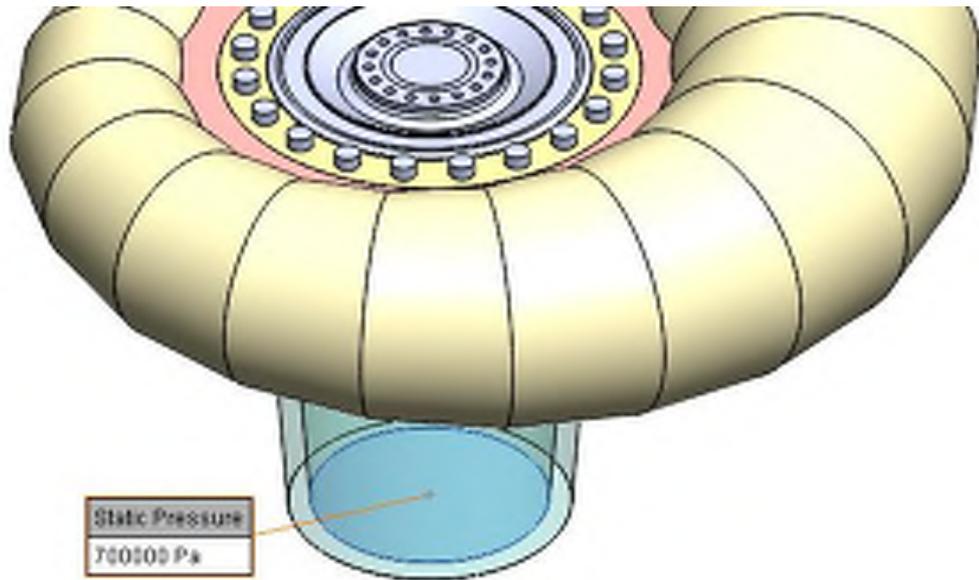
**Realizado por:** Autores

Con una correcta configuración del asistente de *Flow Simulation* el Software asignó un dominio computacional (véase Figura 2-42) sobre la geometría de la turbina, mismo que fue verificado en cada una de sus vistas para evitar que alguna región interna de la turbina quede excluida del análisis.



**Figura 2-43:** Selección de la cara de ingreso del fluido con un Caudal asignado de 58  $m^3/s$

**Realizado por:** Autores



**Figura 2-44:** Selección de la cara de salida del fluido con una presión estática de 700000 Pa.

**Realizado por:** Autores

Los parámetros o condiciones de frontera del fluido asignado al modelo geométrico de la turbina Francis se pueden apreciar en valor y ubicación en la Figura 2-43 y Figura 2-44.

#### 2.5.3.2. *Generación de la malla sobre la turbina Francis*

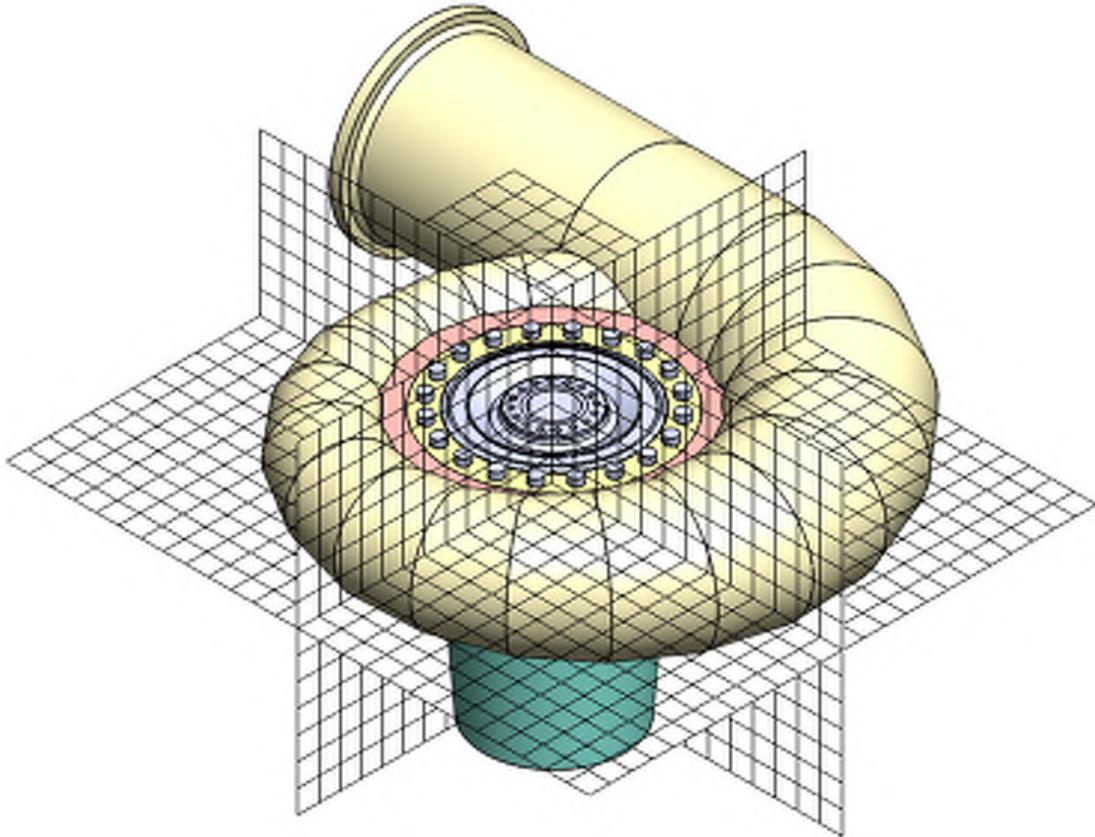
*Solidworks* posee dos opciones de mallado, por asignación automática y manual.

Por defecto el nivel de malla del modo automático se encuentra preestablecido en tamaño 3 en un rango de 1 a 7, donde 1 es un mallado básico de celda amplia y 7 es un mallado fino con celdas volumétricas de menor tamaño que entregan resultados más acertados.

Cabe señalar que un número de malla más grande exige mayor consumo de recursos computacionales, razón por la cual es necesario conocer los límites de hardware que el ordenador tiene.

Una malla configurada en modo manual permite seleccionar regiones en las que se desea que las celdas tengan un número mayor o menor según la conveniencia del caso y los resultados que se deseen obtener.

Para el caso de la turbina Francis el mallado se lo configura de manera automática con un tamaño de malla número 5, misma que se puede apreciar en la Figura 2-45.



**Figura 2-45:** Malla de nivel 5 asignada a la geometría de la Turbina Francis.

**Realizado por:** Autores

#### 2.5.3.3. *Proceso de cálculo*

Tras realizar la configuración del proyecto con el asistente de *Flow Simulation*, la convergencia tendrá las características indicadas en la Tabla 2-3.

**Tabla 2-3:** Celdas asignadas y tiempo de resolución del proyecto

Parámetro	Valor
Celdas asignadas al modelo	7472
Celdas en contacto con el modelo	3818
Tiempo estimado de cálculo	1 hora 27 minutos

**Fuente:** Autores

**Realizado por:** Autores

#### 2.5.3.4. *Generación de planos.*

Generar planos de contorno permite visualizar la evolución de una propiedad determinada del fluido sobre la superficie con la cual se encuentra en contacto. Estos planos pueden ser paralelos

o perpendiculares a la superficie (planos de corte), con presentación de resultados en 2D o 3D según se requiera.

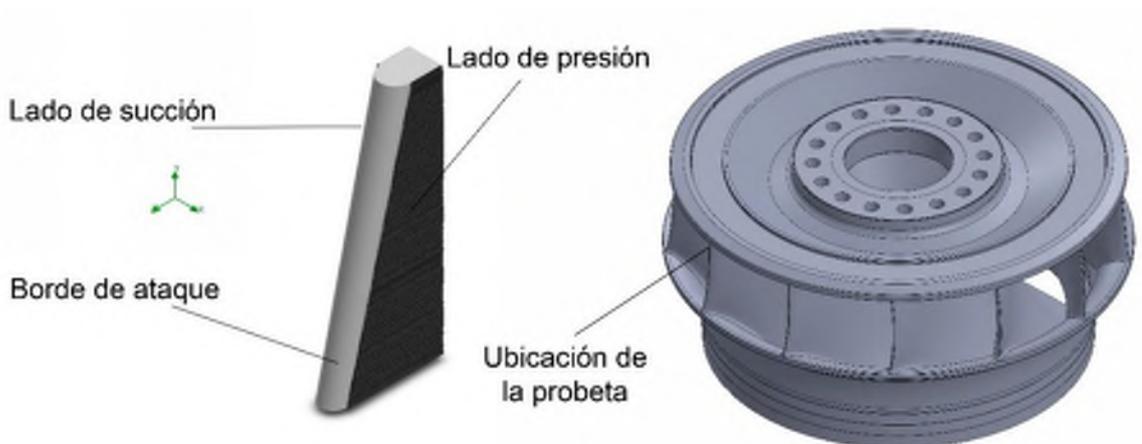
Así mismo el software brinda la posibilidad de generar planos de superficie similares a los planos de corte, con la diferencia que el mapa de colores se genera sobre una cara o superficie completa del modelo geométrico de la probeta.

Para visualizar de mejor manera el comportamiento del fluido y los fenómenos hidráulicos internos de la turbina se generaron dos vistas de corte para analizar los resultados que se obtendrán.

- 1) Vista de corte paralela al plano XY
- 2) Vista de corte paralela al plano XZ

#### 2.5.4. Análisis en la zona de ingreso al rodete Francis

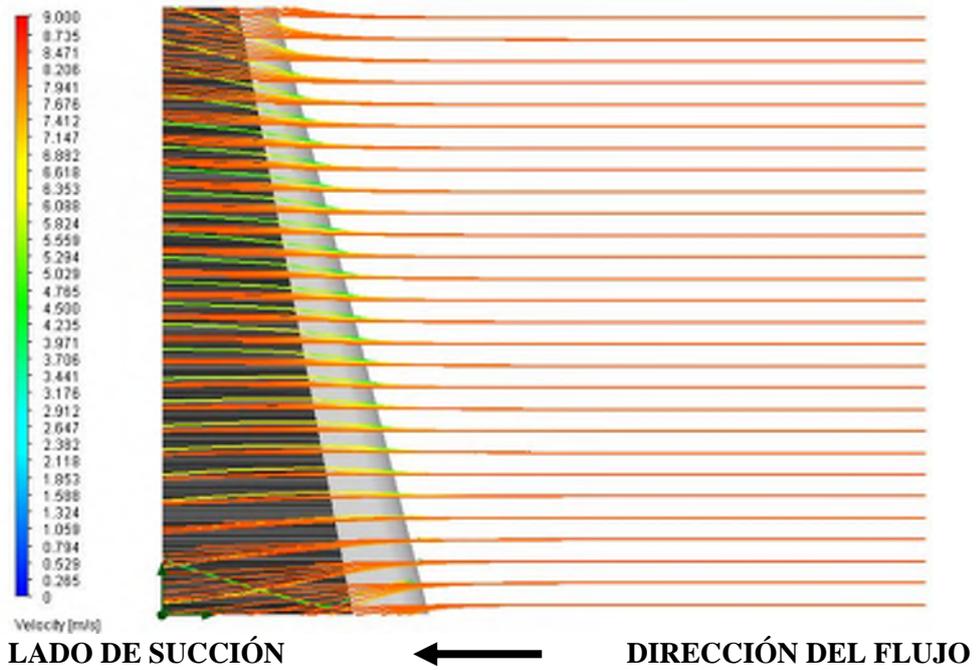
##### 2.5.4.1. Localización de la probeta en el rodete y sentido del flujo.



**Figura 2-46:** Ubicación de la probeta en la zona de ingreso del rodete.

**Realizado por:** Autores

La Figura 2-46 y Figura 2-47, indican la posición de la probeta en la zona de ingreso al rodete y la dirección en la que el fluido ingresa al sistema respectivamente. Para este caso se analizará el comportamiento del fluido en la zona de succión de la probeta.



**Figura 2-47:** Dirección del flujo en la entrada del rodete en el sentido de eje Z negativo.

**Realizado por:** Autores

#### 2.5.4.2. *Parámetros de simulación*

Los parámetros de simulación para la probeta al ingreso del rodete se especifican a detalle en la Tabla 2-4.

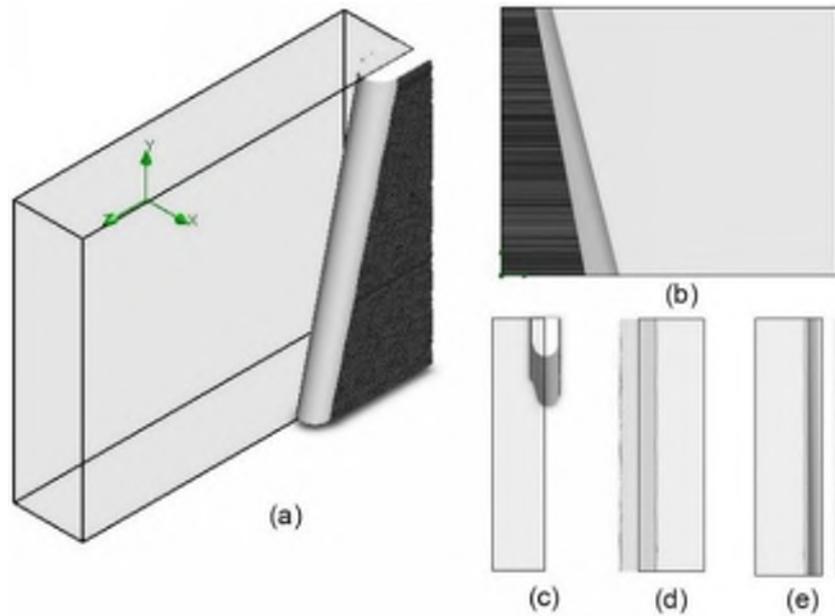
**Tabla 2-4:** Parámetros del fluido en la zona de ingreso al rodete.

Parámetro	Valor
Sistema de unidades	Sistema internacional
Presión del fluido	2133655.96 [Pa]
Gravedad	9.777 m/s <sup>2</sup>
Fluido de trabajo	Agua
Tipo de flujo	Turbulento
Condiciones de la pared	Adiabática
Temperatura del fluido	16 °C
Velocidad del fluido	8.205 m/s
Eje de entrada del fluido	-z
Turbulencia	5%

**Fuente:** Autores

**Realizado por:** Autores

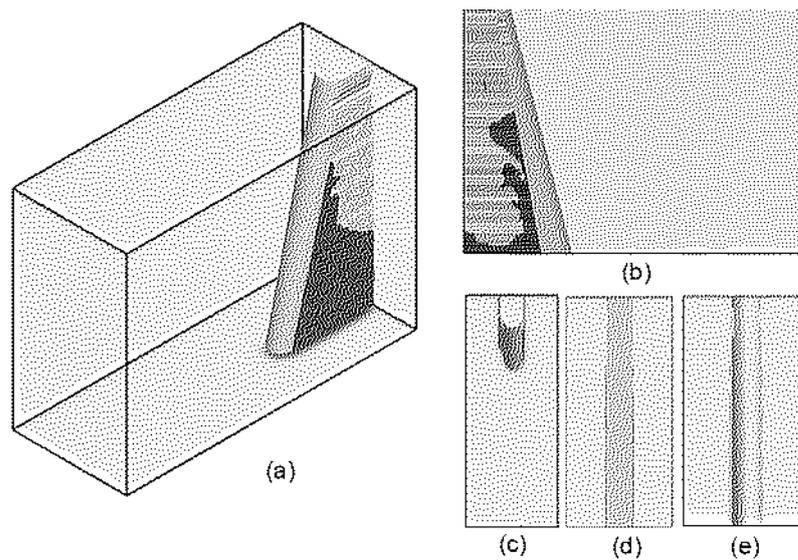
### 2.5.4.3. Dominio computacional



**Figura 2-48:** Dominio computacional probeta sin desgaste. a) Vista isométrica b) Lado de succión c) Vista frontal d) Vista superior e) Vista inferior

**Realizado por:** Autores

El dominio computacional se asigna de tal manera que cubra completamente la zona que se desea analizar considerando que por ella pasará el fluido. En este caso como lo indica la Figura 2-48 y Figura 2-49 el fluido ingresa en sentido opuesto al eje Z.



**Figura 2-49:** Dominio computacional probeta con desgaste: a) Vista isométrica b) Lado de succión c) Vista frontal d) Vista superior e) Vista inferior

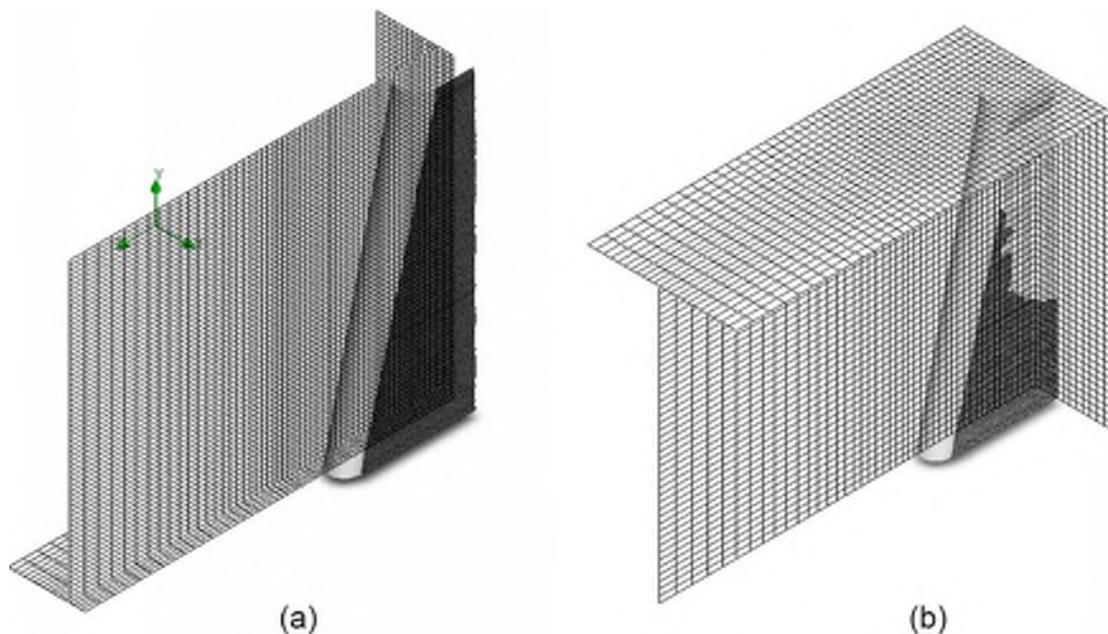
**Realizado por:** Autores

#### 2.5.4.4. Generación de la malla

Dada la elevada cantidad de curvas y líneas de croquis que el modelo contiene hace que su complejidad sea alta.

Por esta razón se optó por trabajar con un mallado automático de nivel 4 sobre la mitad de la probeta asumiendo la simetría del modelo y con un mallado completo sobre la probeta con desgaste superficial.

En la Figura 2-50 se puede apreciar las diferentes mallas asignadas a los dos modelos de probeta. En el apartado a) se observa la geometría de malla sobre la probeta sin desgaste superficial, mientras el apartado b) indica la malla aplicada sobre la probeta con desgaste superficial tanto en la capa de metalizado como en el metal base.



**Figura 2-50:** Mallado aplicado sobre la probeta ubicada al ingreso del rodete. a) Sin desgaste en su capa de metalizado b) Con desgaste sobre la capa de metalizado.

**Realizado por:** Autores

#### 2.5.4.5. Proceso de cálculo

Una vez completada la configuración del asistente de simulación, dominio computacional, objetivo y mallado se procede a ejecutar la simulación para que el ordenador realice los cálculos necesarios y entregue resultados para su posterior análisis. El número de celdas y tiempo de cálculo estimado para el escenario de la probeta sin desgaste y la probeta con desgaste se indican en la Tabla 2-5 y Tabla 2-6 respectivamente.

En este caso la suite *Flow Simulation* realizará el siguiente proceso:

- Preparación del modelo
- Generación de la malla
- Inicio del cálculo

**Tabla 2-5:** Celdas y tiempo asignado al cálculo de la probeta sin desgaste.

Parámetro	Valor
Celdas asignadas al modelo	104 612
Celdas en contacto con el modelo	5 644
Tiempo estimado de cálculo	3 horas 12 minutos

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

**Tabla 2-6:** Celdas y tiempo asignado al cálculo de la probeta con desgaste

Parámetro	Valor
Celdas asignadas al modelo	71 302
Celdas en contacto con el modelo	5 427
Tiempo estimado de cálculo	21 minutos 17 segundos

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

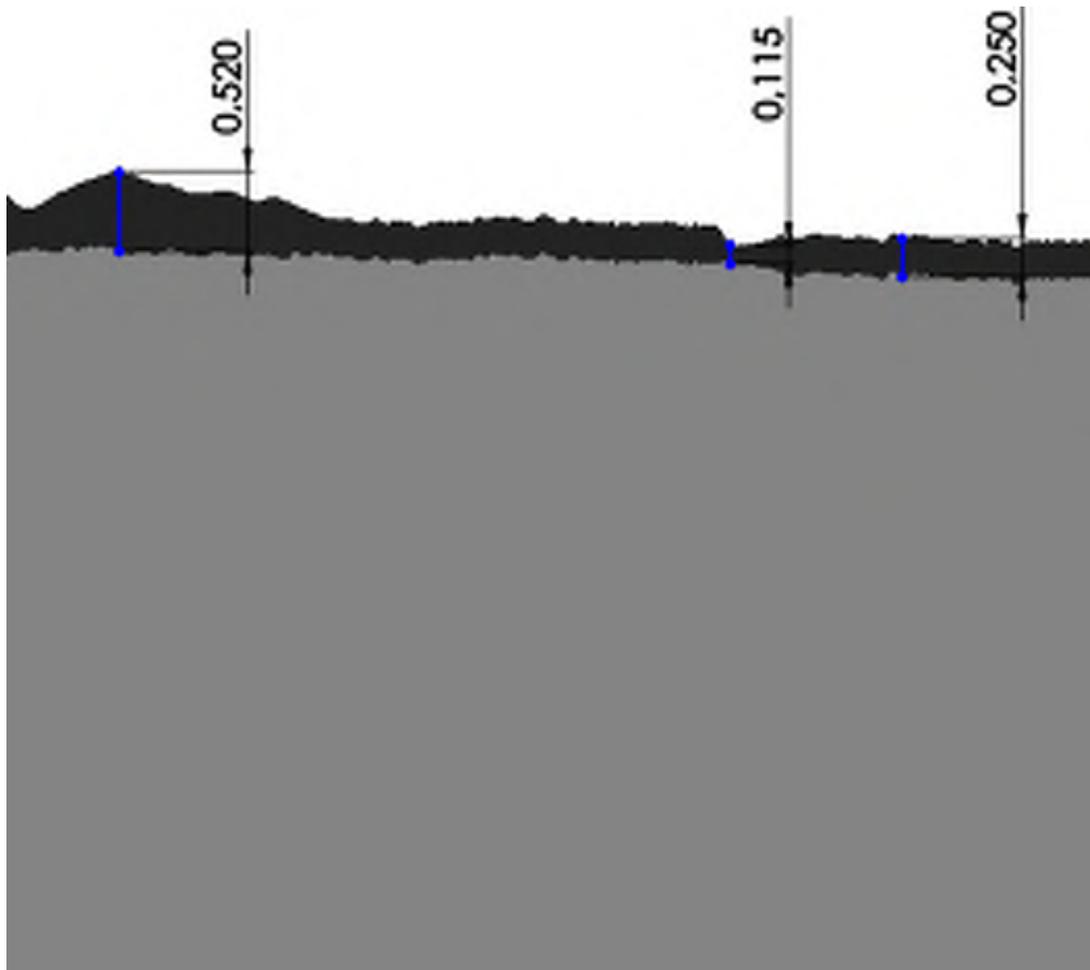
#### 2.5.4.6. Generación de planos

##### 2.5.4.6.1. Planos y puntos de análisis sobre la probeta sin desgaste en su capa de metalizado

Para realizar un análisis comparativo de los resultados se graficaron 3 planos sobre la superficie de la probeta con las siguientes características en su capa de metalizado:

- Espesor de 115  $\mu\text{m}$
- Espesor de 250  $\mu\text{m}$
- Espesor de 520  $\mu\text{m}$

En donde 115  $\mu\text{m}$  se considera un espesor menor al nominal, 250  $\mu\text{m}$  se considera un espesor nominal o recomendado y 520  $\mu\text{m}$  es considerado un sobre espesor de la capa de metalizado de carburo de tungsteno.



**Figura 2-51:** Selección de puntos con espesores de 115  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$  y 520  $\mu\text{m}$ .

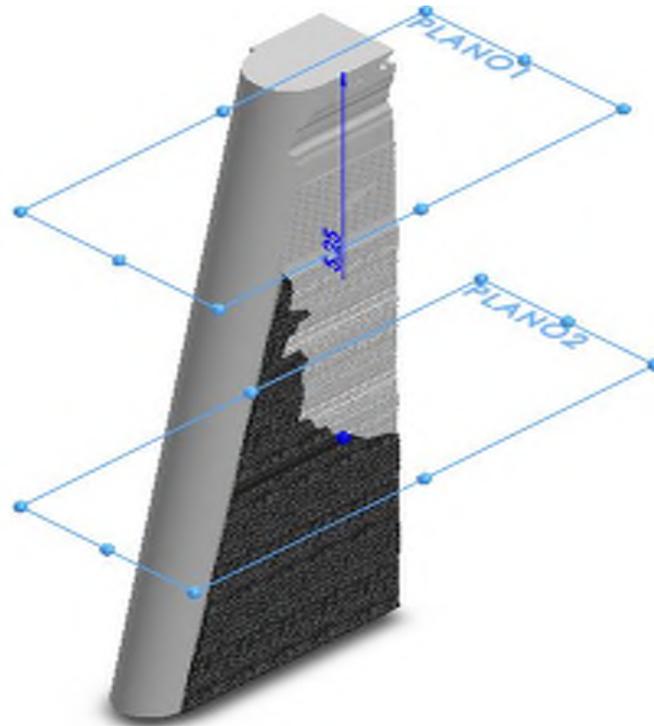
**Realizado por:** Autores

La Figura 2-51, permite observar los 3 distintos espesores de análisis sobre la capa de metalizado. Siendo 250  $\mu\text{m}$  el espesor nominal recomendado para los recubrimientos metálicos sobre elementos hidráulicos. El espesor de 520  $\mu\text{m}$  permitirá observar que ocurre con el fluido cuando en su trayecto se encuentra con sobre espesores.

#### 2.5.4.6.2. Planos de análisis sobre la probeta con desgaste superficial

Sobre la probeta con desgaste se generaron dos planos transversales paralelos al plano XZ con las siguientes características (véase Figura 2-52):

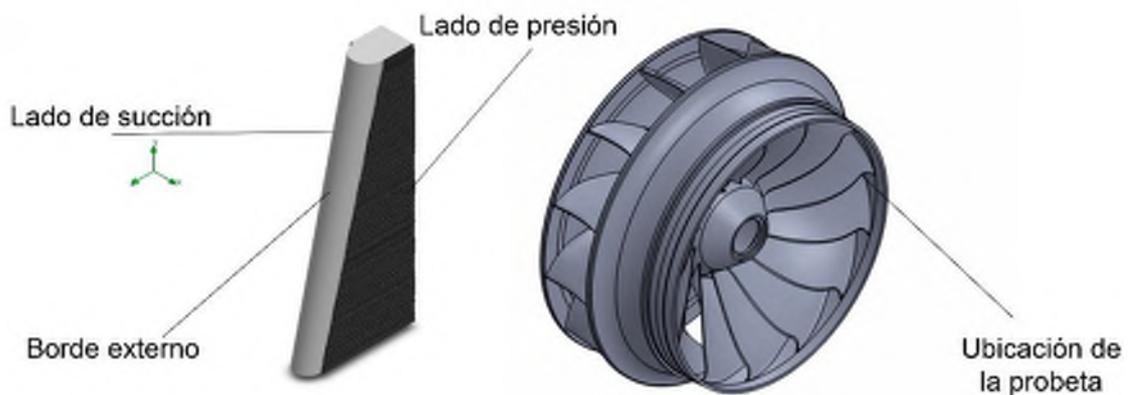
- 1) Plano número 1 sobre el metal base
- 2) Plano número 2 en la zona de convergencia del metal base y capa de metalizado.



**Figura 2-52:** Planos de sección generada en diferentes escenarios de la probeta.

Realizado por: Autores

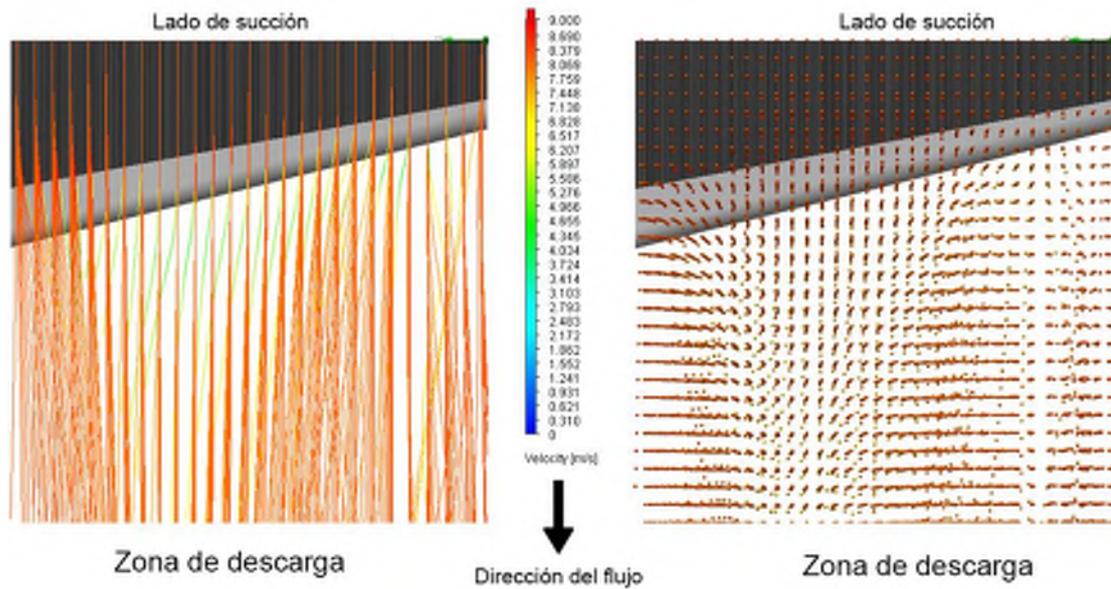
### 2.5.5. Análisis en la zona de salida del rodete Francis



**Figura 2-53:** Ubicación de la probeta en la zona de salida del rodete.

Realizado por: Autores

La posición de la probeta en la zona de descarga del rodete se indica en la Figura 2-53. Se puede apreciar con claridad que se encuentra ubicada en la zona de salida del álabe.



**Figura 2-54:** Dirección del flujo a la salida del rodete.

Realizado por: Autores

En la Figura 2-54, se puede apreciar la dirección del fluido abandonando la probeta, es decir dirigiéndose hacia la zona de descarga del rodete.

#### 2.5.5.1. Parámetros de simulación

Los parámetros de simulación utilizados para el escenario de la probeta sin desgaste superficial se indican detalladamente en la Tabla 2-7.

**Tabla 2-7:** Parámetros de simulación para la probeta en la zona de descarga del rodete Francis.

Parámetro	Valor
Sistema de unidades	Sistema internacional
Presión del fluido	2133655.96 [Pa]
Gravedad	9.777 m/s <sup>2</sup>
Fluido de trabajo	Agua
Tipo de flujo	Turbulento
Condiciones de la pared	Adiabática
Temperatura del fluido	16 °C
Velocidad del fluido	8.205 m/s
Eje de entrada del fluido	z
Turbulencia	5%

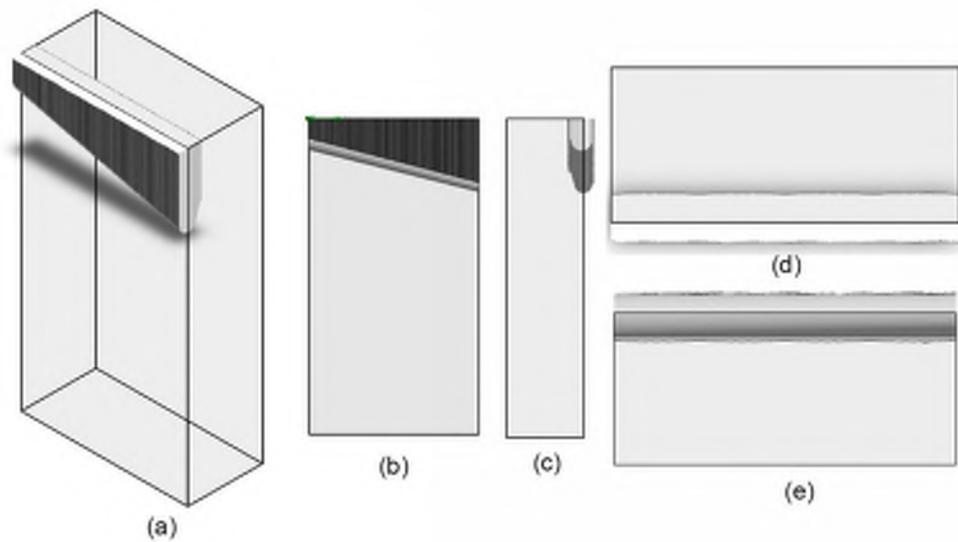
Fuente: (Mora Sánchez, 2018)

Realizado por: Autores

### 2.5.5.2. Dominio computacional

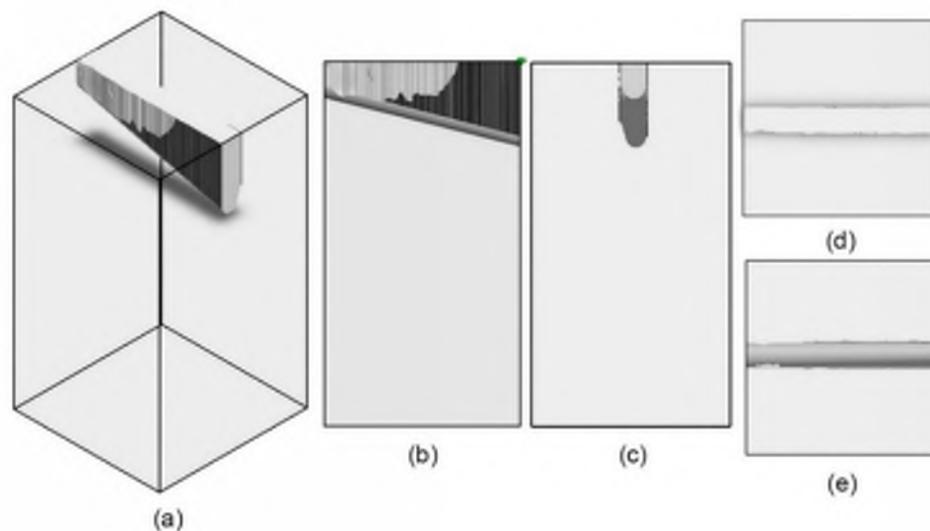
El dominio computacional se asigna de tal manera que cubra completamente la zona que se desea analizar considerando que por ella pasará el fluido.

En este caso como lo indica la Figura 2-54, el fluido ingresa en sentido opuesto al eje de las Y, por lo que se configuró el dominio computacional tal como se indica a continuación.



**Figura 2-55:** Dominio computacional probeta sin desgaste superficial: a) Vista isométrica b) Lado de presión c) Vista frontal d) Vista superior e) Vista inferior.

Realizado por: Autores



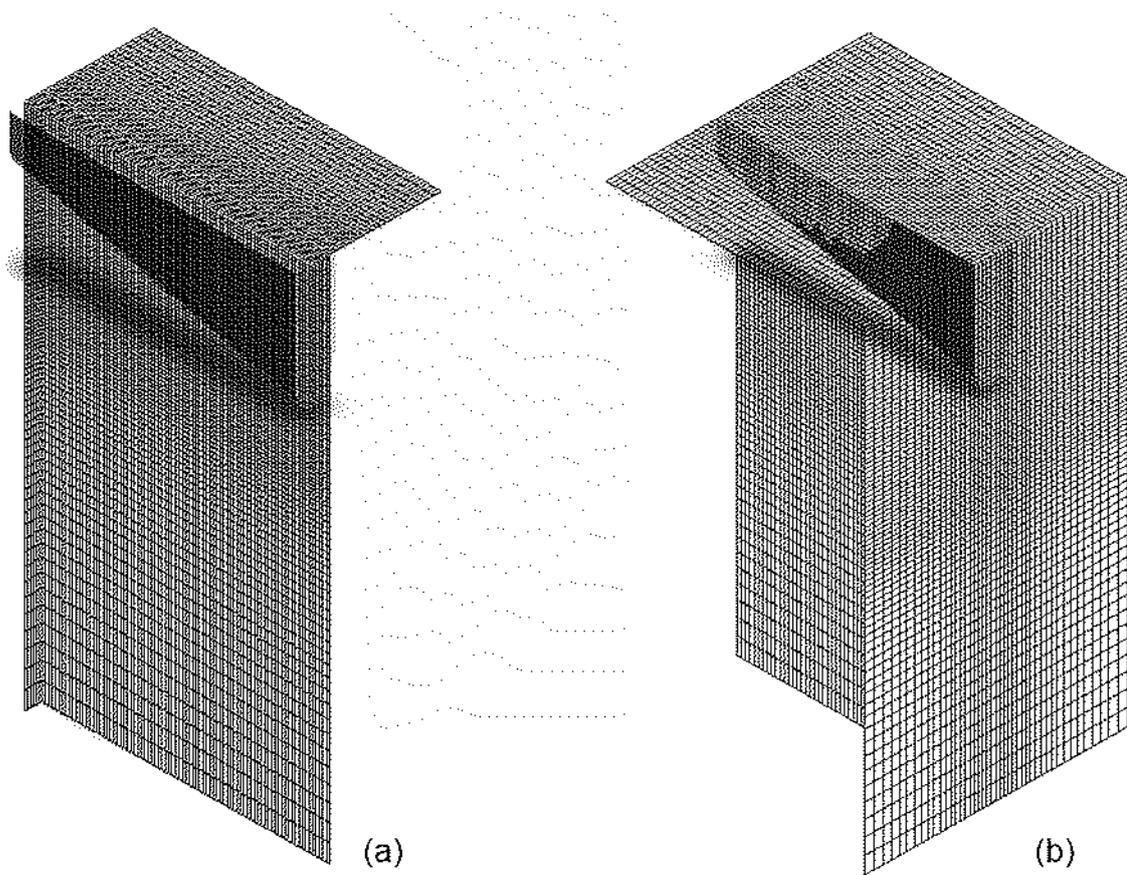
**Figura 2-56:** Dominio computacional probeta con desgaste superficial: a) Vista isométrica b) Lado de presión c) Vista frontal d) Vista superior e) Vista inferior.

Realizado por: Autores

Es necesario ayudarse de cada una de las vistas del sólido para verificar que el dominio computacional cubra correctamente cada una de las zonas de análisis sin que ninguna se quede fuera o a su vez que el dominio computacional sea muy extenso considerando zonas que no son de interés como lo describe la Figura 2-55 y Figura 2-56 respectivamente.

### 2.5.5.3. Generación de la malla

Sobre la probeta sin desgaste se trabajó con un mallado sobre la mitad del sólido asumiendo la simetría de este, mientras que sobre la probeta con desgaste superficial se realizó un mallado completo. En ambos casos se utilizó un nivel de malla número 5 (véase Figura 2-57).



**Figura 2-57:** Mallado aplicado sobre la probeta ubicada a la salida del rodete. A) Sin desgaste en su capa de metalizado b) Con desgaste sobre la capa de metalizado.

**Realizado por:** Autores

#### 2.5.5.4. *Proceso de cálculo.*

**Tabla 2-8:** Número de celdas y tiempo asignados al modelo sin desgaste superficial.

Parámetro	Valor
Celdas asignadas al modelo	242 761
Celdas en contacto con el modelo	7 934
Tiempo estimado de cálculo	23 minutos 41 segundos

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

**Tabla 2-9:** Número de celdas y tiempo asignados al modelo con desgaste superficial

Parámetro	Valor
Celdas asignadas al modelo	206 482
Celdas en contacto con el modelo	8 644
Tiempo estimado de cálculo	19 minutos 39 segundos

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

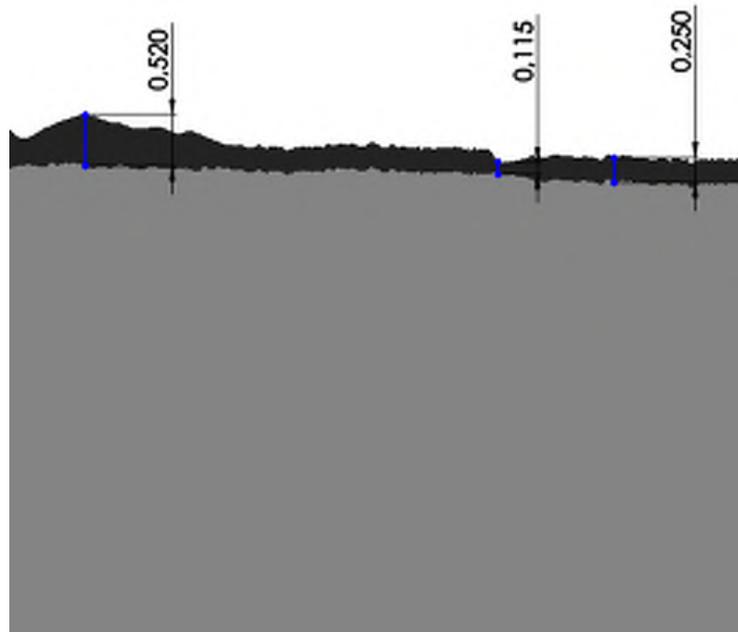
La Tabla 2-8 y Tabla 2-9 respectivamente detallan el número de celdas asignadas al sólido después de aplicar una malla de nivel 4 sobre cada elemento.

#### 2.5.5.5. *Generación de planos*

Para la probeta sin desgaste en su capa de metalizado se procede a realizar un análisis comparativo de los resultados. Se graficaron 3 planos sobre la superficie de la probeta como se indica en la Figura 3-58 con las siguientes características en su capa de metalizado:

- 1) Espesor de 115  $\mu\text{m}$
- 2) Espesor de 250  $\mu\text{m}$
- 3) Espesor de 520  $\mu\text{m}$

En donde 115  $\mu\text{m}$  se considera un espesor menor al nominal, 250  $\mu\text{m}$  se considera un espesor nominal o recomendado y 520  $\mu\text{m}$  es considerado un sobre espesor de la capa de metalizado de carburo de tungsteno.

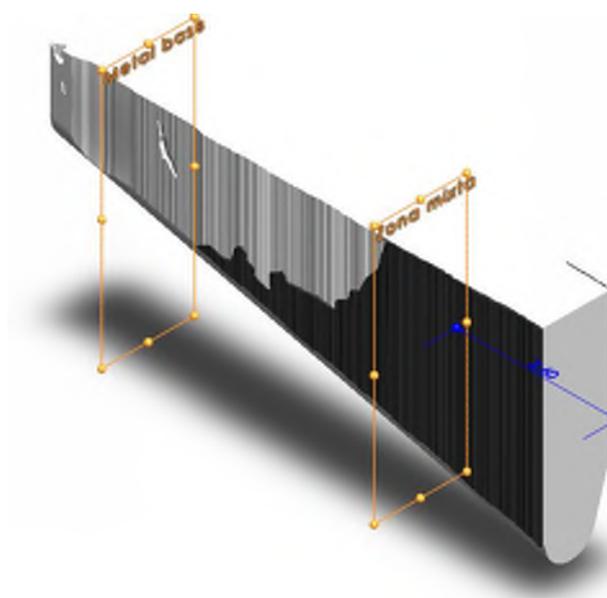


**Figura 2-58:** Selección de puntos con espesores de 115  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$  y 520  $\mu\text{m}$ .

**Realizado por:** Autores

Para el caso de la probeta con desgaste superficial se generaron dos planos transversales paralelos al plano YZ con las siguientes características, tal como se observa en la Figura 2-59:

- 1) Plano de corte en la zona del metal base
- 2) Plano de corte en la zona de convergencia del metal base y capa de metalizado.



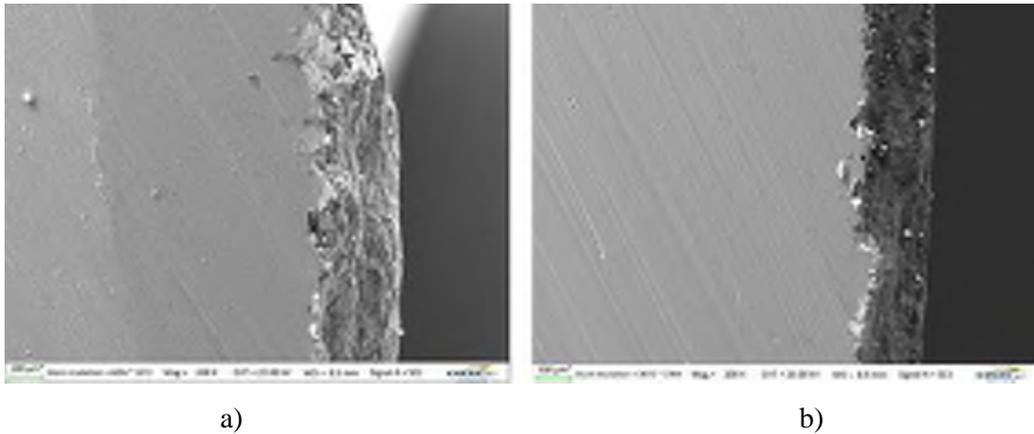
**Figura 2-59:** Asignación de planos en las zonas de metal base y convergencia con la capa de metalizado.

**Realizado por:** Autores

### 3. CAPITULO III: MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

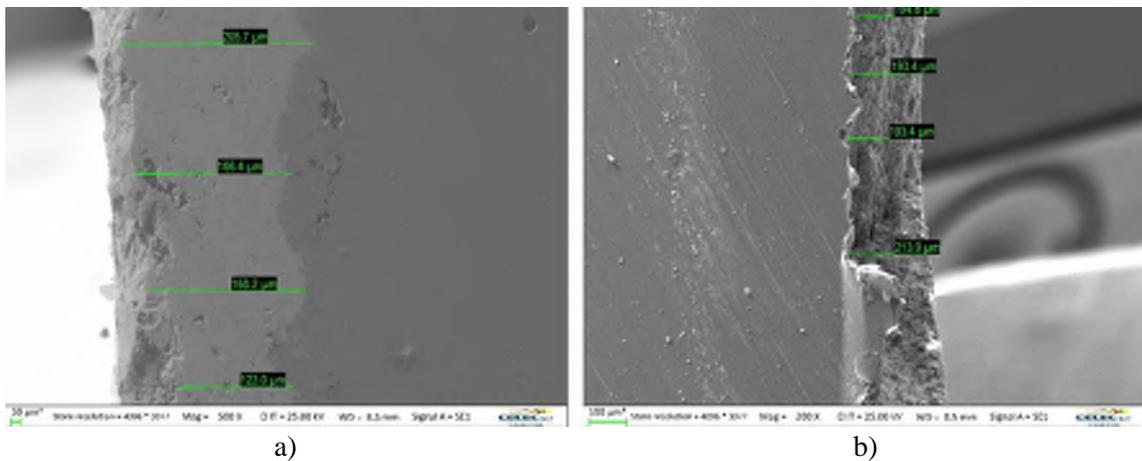
En este capítulo se detallan los resultados obtenidos tras analizar la probeta en el SEM, su posterior modelado en *Solidworks* y simulación de cada uno de los escenarios en *Flow simulation*.

#### 3.1. Perfil de anclaje y capa de metalizado



**Figura 3-1:** Obtención de perfiles en el SEM. a) Capa de metalizado b) Perfil de anclaje

Realizado por: Autores



**Figura 3-2:** Obtención de espesor y perfil de la capa de metalizado mediante SEM. a) Perfil del lado de succión b) Perfil del lado de presión.

Realizado por: Autores

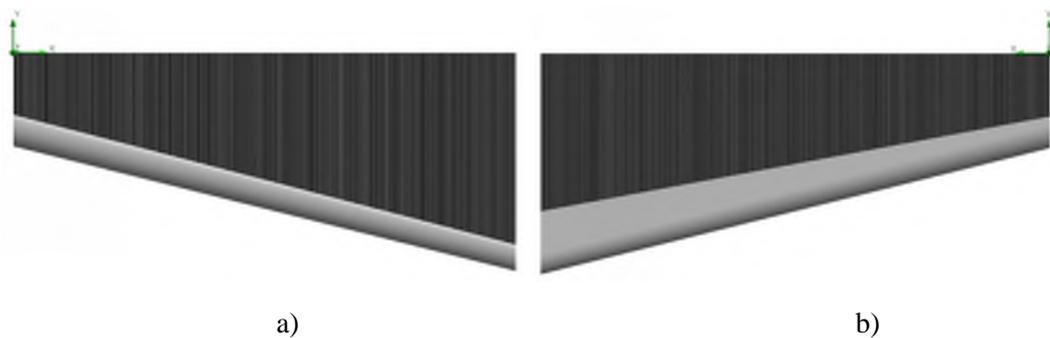
La Figura 3-1 y Figura 3-2, fueron obtenidas mediante el detector de electrones secundarios del SEM, el pie de imagen evidencia esta distinción mediante las siglas SE1. Estas imágenes nos permiten visualizar el perfil que tiene la probeta de estudio, así como los espesores de la capa de metalizado junto con el perfil de anclaje que esta tiene, tanto en el lado de succión como en el

lado de presión. Esto nos permitirá posteriormente trazar líneas de manera que se pueda obtener un modelo del perfil, que será utilizado para el modelado de la probeta en su totalidad.

### 3.2. Ensamble de la probeta.

La probeta fue ensamblada respetando las relaciones de posición de cada uno de sus elementos obteniendo el siguiente resultado.

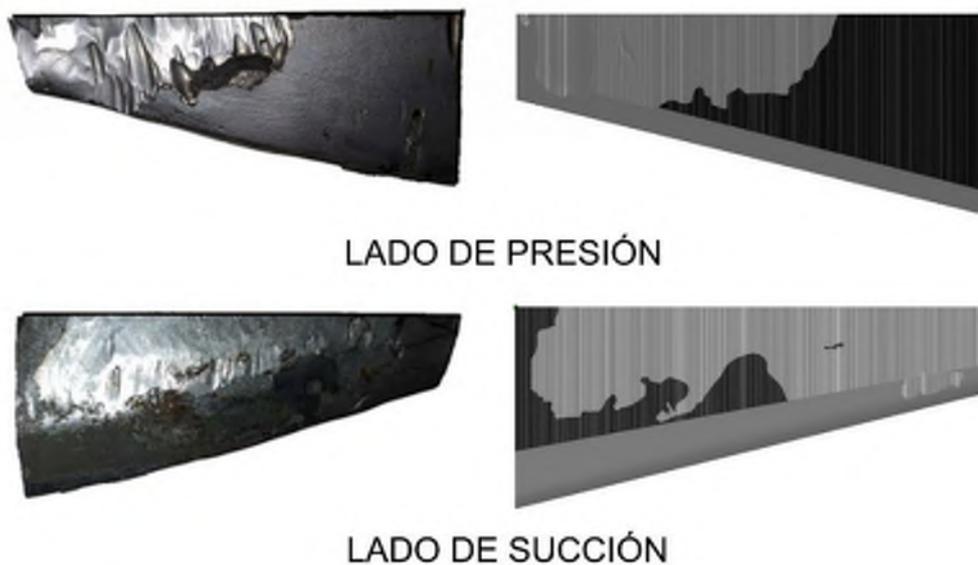
#### 3.2.1. *Probeta sin desgaste superficial*



**Figura 3-3:** Probeta sin desgaste superficial. a) Lado de presión b) Lado de succión

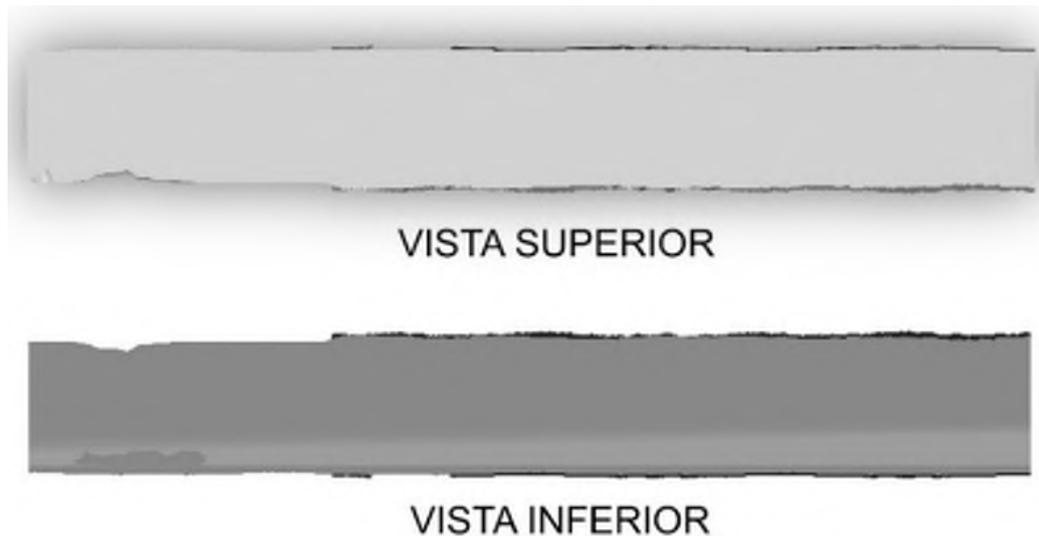
Realizado por: Autores

#### 3.2.2. *Probeta con desgaste superficial en su capa de metalizado y metal base*



**Figura 3-4:** Comparación de las vistas laterales de la probeta real y modelada con desgaste superficial de su capa de metalizado.

Realizado por: Autores



**Figura 3-5:** Comparación de las vistas superior e inferior de la probeta modelada.

**Realizado por:** Autores

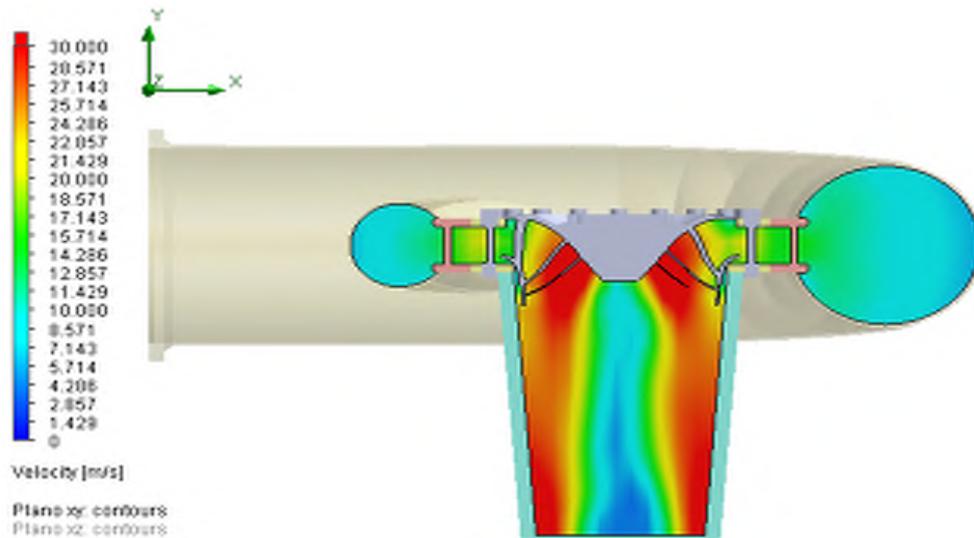
La Figura 3-3, es el resultado obtenido del modelado de la probeta sin desgaste superficial, su obtención como se detalla en el procedimiento se basa en las medidas reales de la probeta física, y la capa de metalizado es adherida por ensamble, puesto que se obtiene a través del perfil obtenido de las imágenes de barrido en el SEM.

La Figura 3-4, permite observar una comparación entre la probeta con desgaste en la capa de metalizado y metal base con el modelo 3D obtenido. Para ello se parte de la probeta sin desgaste superficial, se realiza sobre ella distintas operaciones con el fin de obtener la apariencia de desgaste en el metal base que se visualiza en la probeta física, el desgaste que presenta el metalizado es trazado con la ayuda de los perfiles que se obtuvieron del SEM. De esa manera se realiza un nuevo ensamble obteniendo el modelado de la probeta con la mayor cantidad de detalles de similitud. La Figura 3-5, muestra desde una vista superior e inferior el acabado de la probeta modelada, pudiéndose visualizar distintas cavidades que representan desgaste sobre el metal base y el perfil de la capa de metalizado con distintos espesores.

### **3.3. Comportamiento del fluido en el interior de la turbina.**

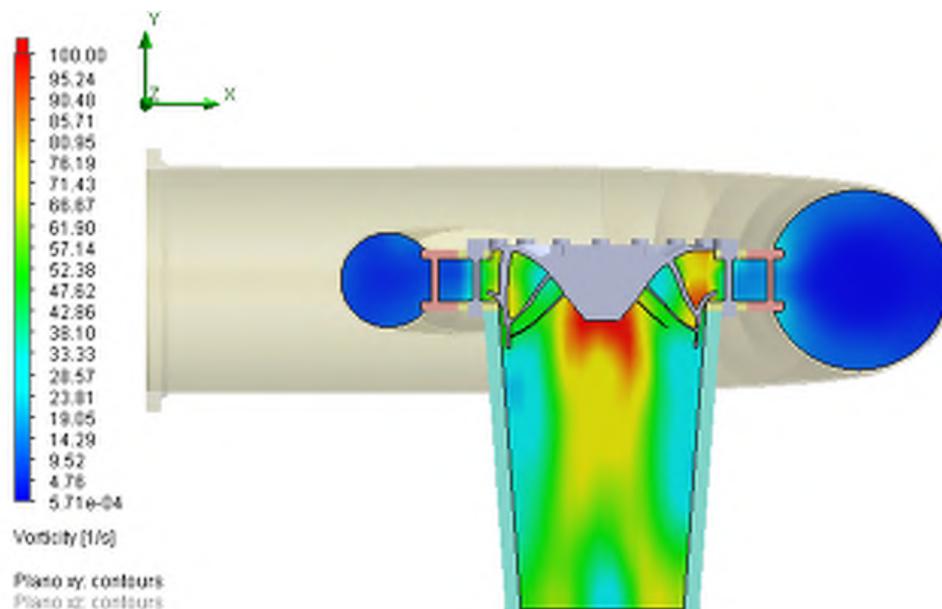
La convergencia de los datos preliminares permitió obtener gráficas de velocidad, presión, vorticidad y turbulencia que permiten conocer de mejor manera el comportamiento del fluido cuando atraviesa los diferentes elementos hidráulicos de la turbina. De esta manera se podrá establecer conclusiones acerca de que le sucede específicamente al interior del rodete. La Figura 3-6, nos permite apreciar el perfil de velocidad claramente definido a su paso por el interior de la turbina. Encontramos que se producen gradientes en los valores de velocidad entre la zona del caracol y el ingreso al rodete donde la velocidad crece progresivamente a medida que el fluido

cruza la turbina (zona roja). La velocidad alcanza sus valores máximos en la zona interna del rodete, específicamente al atravesar los álabes, valores que tienden a descender a medida que el fluido ingresa a la tubería de descarga, presentando las velocidades más altas en sus bordes y decrece de forma considerable en el centro. Este gradiente de velocidades provoca un perfil de vórtice, que tienen el aspecto de un torbellino, que se genera debajo del cono del rodete.



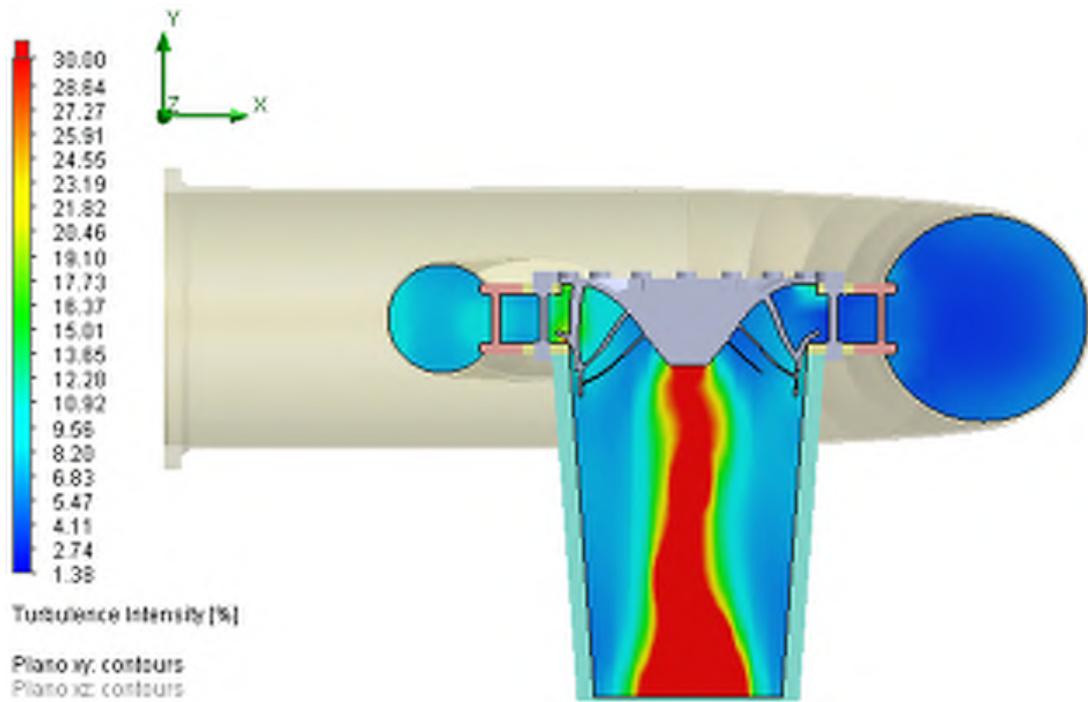
**Figura 3-6:** Resultado de la simulación del perfil de velocidad en el interior de la turbina.

Realizado por: Autores



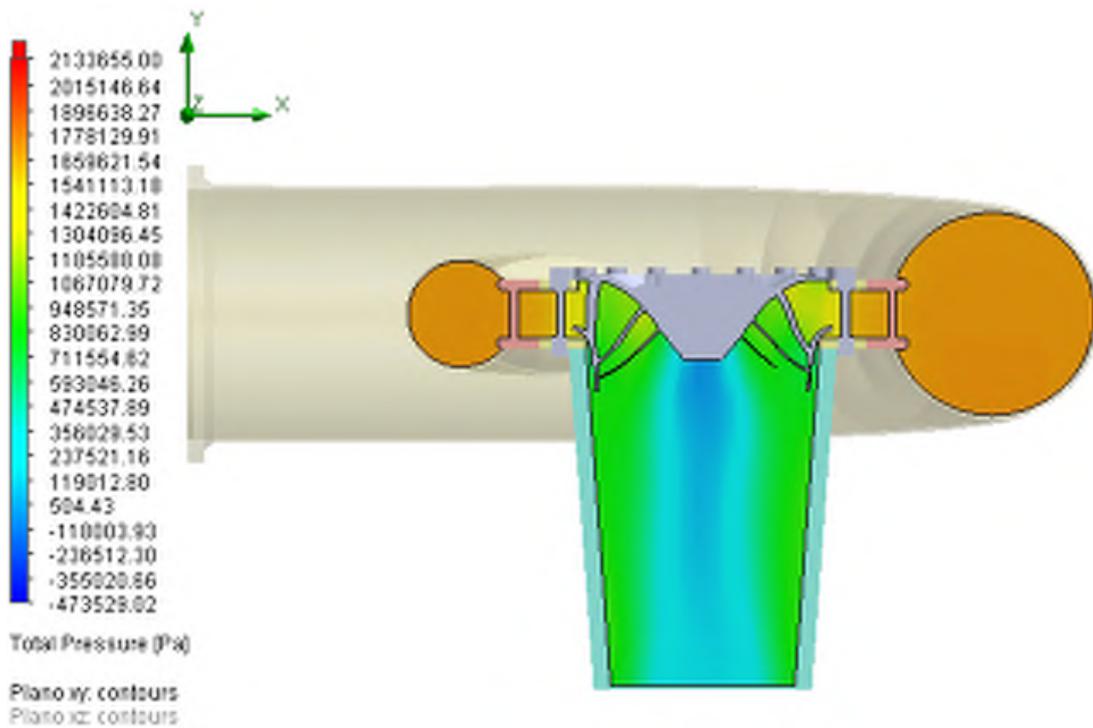
**Figura 3-7:** Resultado de la simulación sobre el perfil de vorticidad al interior de la turbina.

Realizado por: Autores



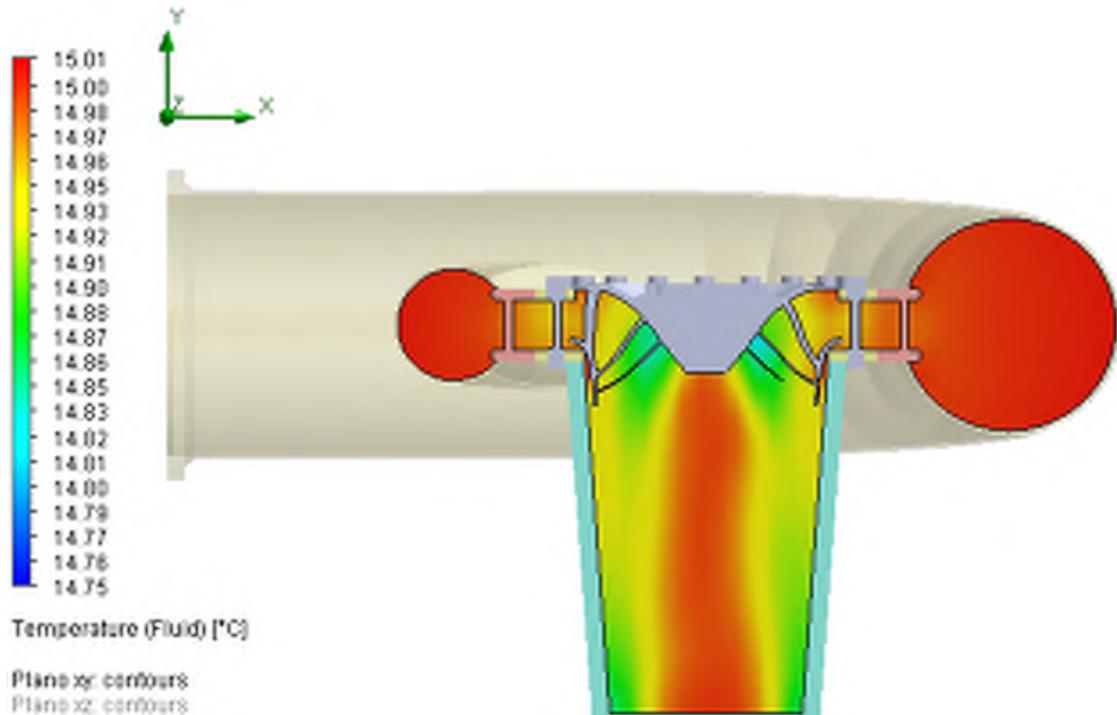
**Figura 3-8:** Resultado de la simulación del perfil de turbulencia en el interior de la turbina.

Realizado por: Autores



**Figura 3-9:** Resultado de la simulación con el perfil de presión en el interior de la turbina.

Realizado por: Autores



**Figura 3-10:** Resultado de la simulación del perfil de temperatura al interior de la turbina.

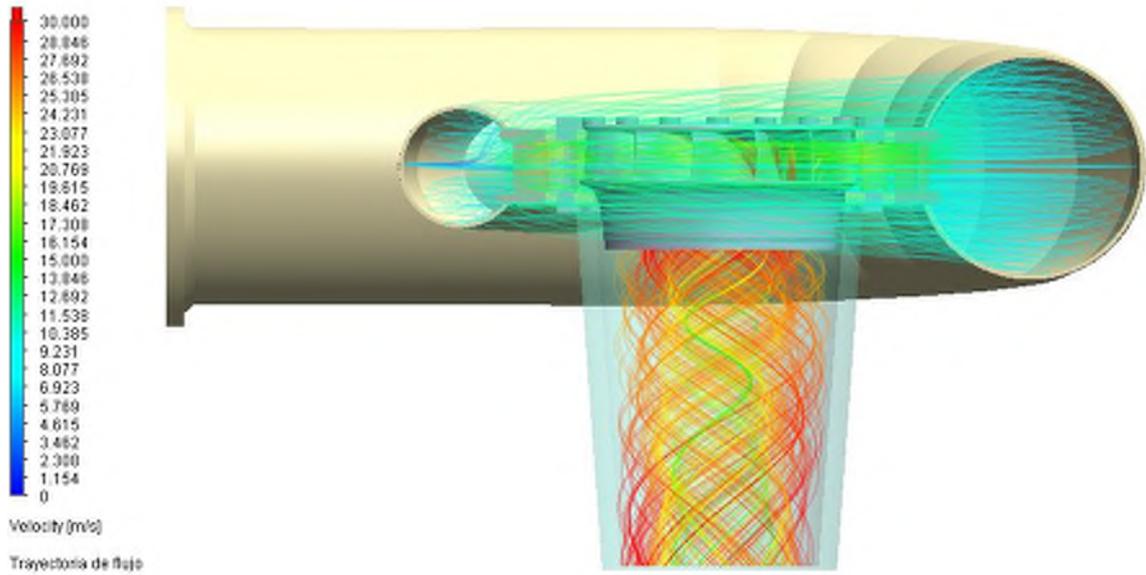
**Realizado por:** Autores

La Figura 3-7 y Figura 3-8, nos permiten observar que en la parte baja del cono del rodete, es decir la descarga de la turbina se genera una zona de alta vorticidad junto con una alta intensidad de turbulencia, además de presiones negativas.

La Figura 3-9, permite visualizar un descenso repentino en los valores de presión, misma que a la entrada del fluido en la turbina presenta valores altos y a medida que viaja por el interior del rodete sufre un descenso brusco, generando una presión de vacío en la zona de descarga. La temperatura al interior de la turbina permanece casi constante puesto que sus variaciones son insignificantes, véase Figura 3-10.

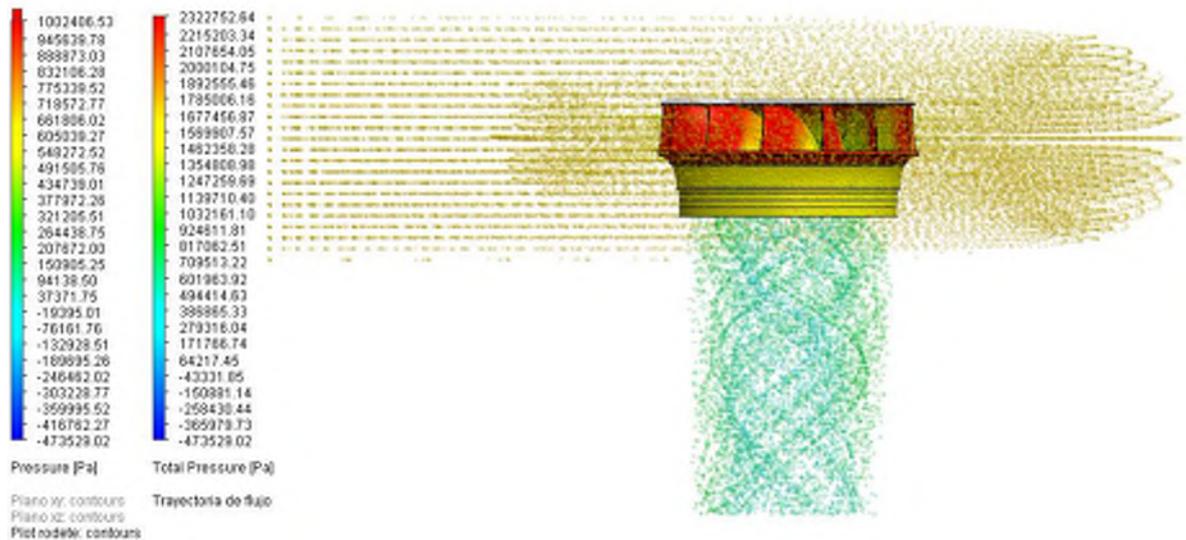
Todos los parámetros expuestos juntos son condiciones para la generación del fenómeno de la cavitación, puesto que, a una temperatura constante del fluido en todo su recorrido, se generan gradientes de velocidad y una presión de vacío en la zona de descarga, generando de esa manera una alta vorticidad, la cual se manifiesta mediante la implosión de las burbujas de fluido. Lo que se convierte en condición fundamental para la generación del fenómeno de cavitación en el borde de salida del álabe. Provocando el desgaste de los elementos hidráulicos que entran en contacto con el fenómeno, es decir, de los álabes en la zona de descarga.

### 3.4. Comportamiento del fluido en el interior del rodete.



**Figura 3-11:** Vista en corte transversal de la turbina, visualizando la trayectoria de la velocidad

**Realizado por:** Autores

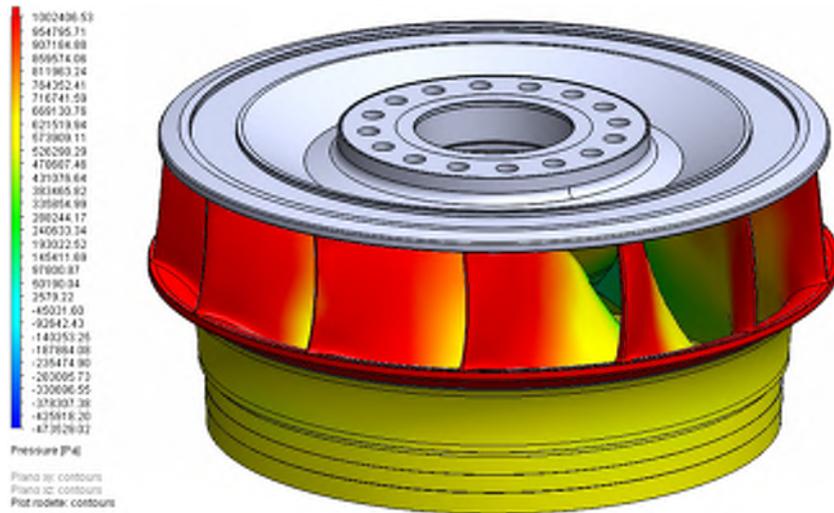


**Figura 3-12:** Perfil de presiones y contorno superficial del fluido sobre el rodete Francis.

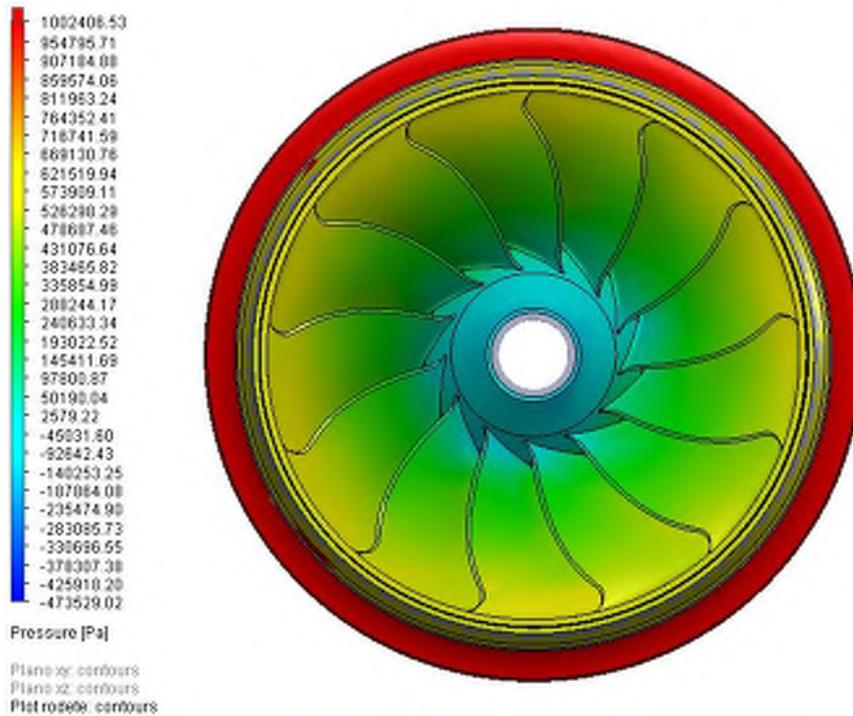
**Realizado por:** Autores

En la Figura 3-11, se puede visualizar el recorrido que toma el fluido mientras atraviesa la turbina, identificando las zonas en las que las líneas de flujo aumentan su velocidad debido a la geometría propia del rodete, de esa manera cuando el flujo abandona el rodete hacia la tubería de descarga se evidencia un gradiente de la velocidad, siendo ésta alta en sus bordes y baja en el centro provocando la formación de un perfil de vórtice debajo del cono del rodete.

En la Figura 3-12, permanecen ocultas las partes de la turbina dejando a la vista únicamente el rodete, de modo que podamos visualizar el comportamiento del perfil de presión del fluido. El mismo que como se mencionó con anterioridad, entra al rodete con una alta presión y sufre una caída en el cono.



(a)



(b)

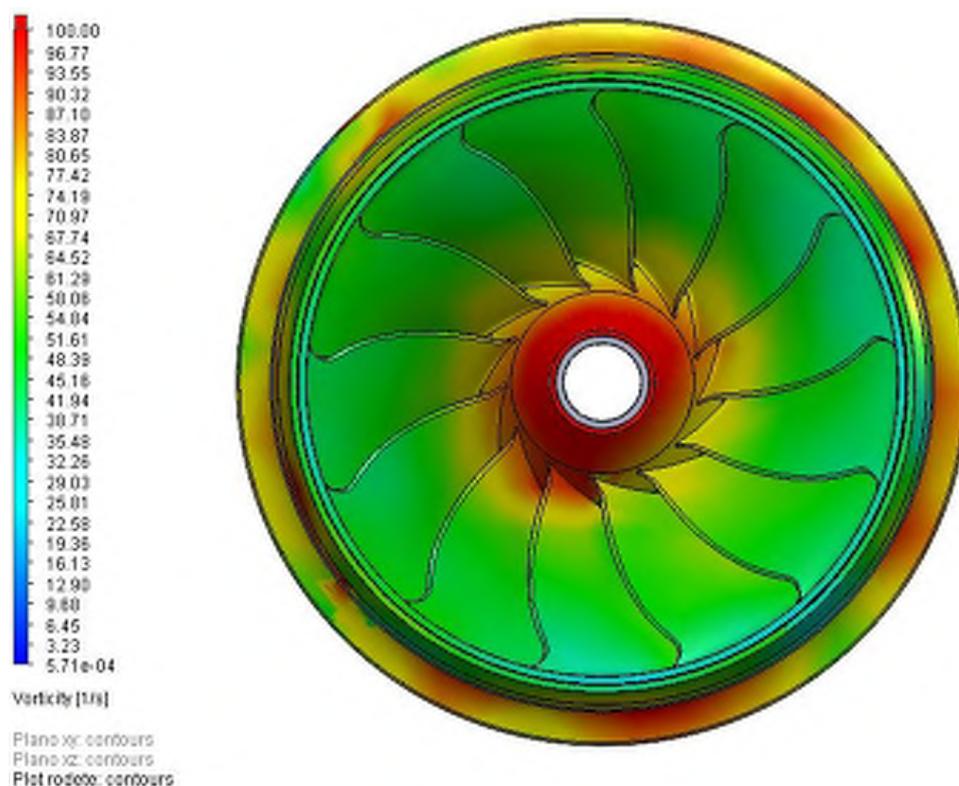
**Figura 3-13:** a) Zonas de alta presión registrada en el ingreso al rodete. b) Zona de baja presión registrada en el cono del rodete.

Realizado por: Autores

En la Figura 3-13, se visualiza los cambios de presión que el sistema genera sobre el fluido. De tal manera que cuando el fluido ingresa al rodete presenta una alta presión y después de recorrer por su interior, se visualiza una caída de la presión en la parte baja de los álabes, es decir, el cono del rodete. La caída de presión genera una presión de vacío que permitirá la formación de cavitación, como consecuencia del remolino formado.

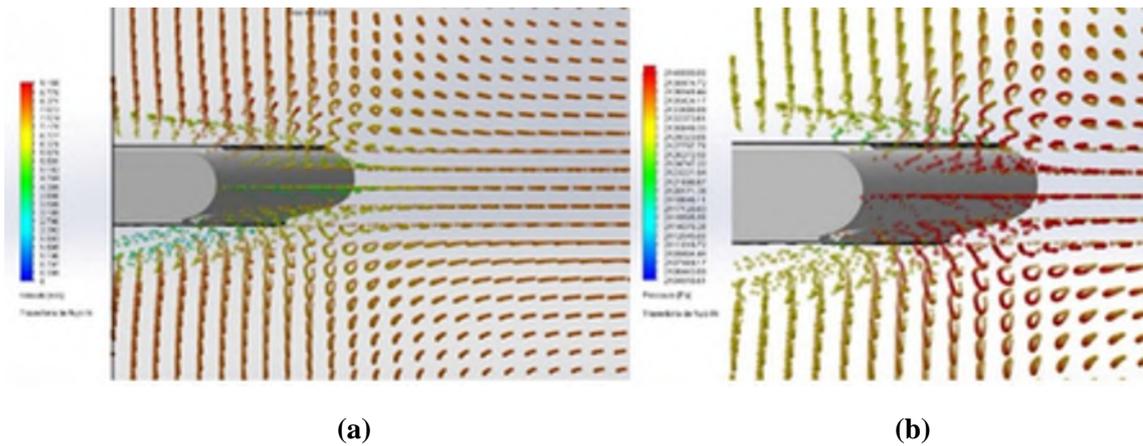
(Toapanta, 2018), manifiesta en su investigación que existen estudios que revelan 4 tipos de cavitación en el interior de un rodete de turbina:

- 1) Cavitación en el borde de ataque del rodete debido a la separación del fluido.
- 2) Cavitación por desplazamiento de burbujas que implosionan en zonas cercanas al borde de salida del álabe del rodete.
- 3) Cavitación producida por el remolino formado en la parte baja del cono del rodete.
- 4) Cavitación de vórtice entre los álabes del rodete debido a que el sistema se encuentra trabajando a carga parcial.



**Figura 3-14:** Zona de vorticidad generada en el cono del rodete.

**Realizado por:** Autores



**Figura 3-15:** Vórtices generados por el impacto del fluido con el borde de ataque de la probeta:  
a) Por velocidad b) Por presión

**Realizado por:** Autores

Analizando la Figura 3-14 y Figura 3-15, se puede evidenciar que se presenta dos de las condiciones idóneas que dan lugar a la formación del fenómeno hidráulico de la cavitación, mencionada con anterioridad, como lo son la concentración de alta vorticidad en la parte baja del cono del rodete y la existencia de un gradiente de presiones a temperatura constante dentro del rodete cuando el fluido atraviesa su geometría.

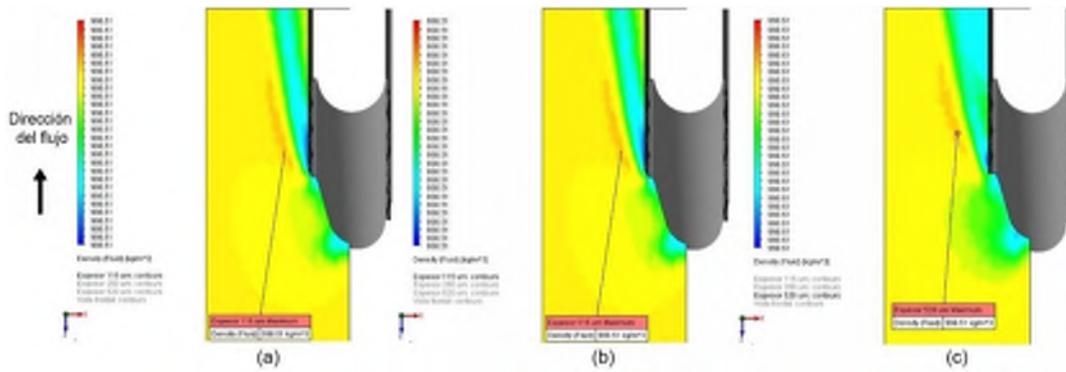
Las demás condiciones producidas por la separación del flujo en el borde de ataque del álabe se analizarán en los ítems siguientes.

### **3.5. Comportamiento del fluido en la zona de ingreso al rodete**

#### **3.5.1. *Probeta sin desgaste en la capa de metalizado***

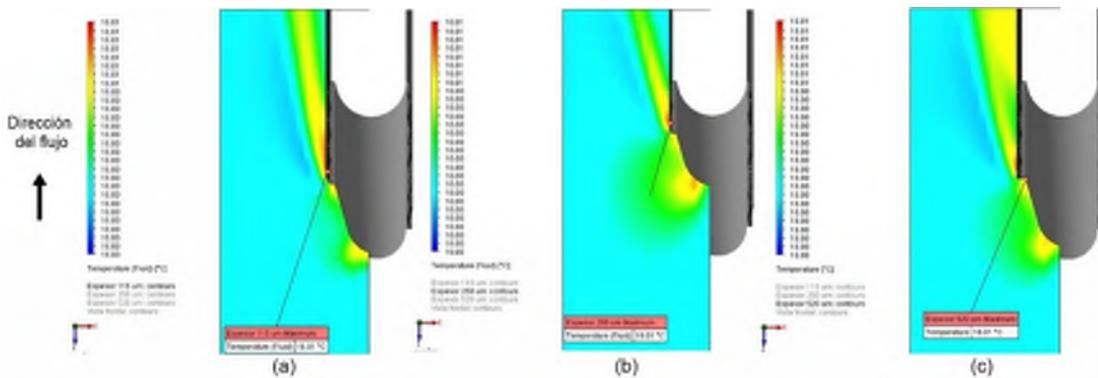
##### **3.5.1.1. *Comportamiento del fluido sobre diferentes espesores de la capa de metalizado.***

Se realizó la convergencia de datos utilizando los parámetros de operación de la turbina en la zona de ingreso al rodete, en donde el fluido se separa por choque directo con el ángulo de ataque del álabe del rodete obteniendo los siguientes resultados:



**Figura 3-16:** Perfil de densidad del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115  $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250  $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520  $\mu\text{m}$

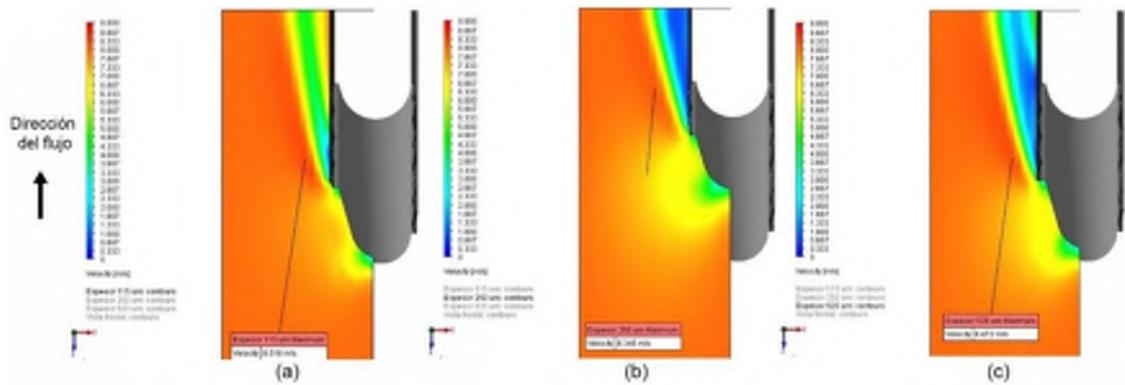
Realizado por: Autores



**Figura 3-17:** Perfil de la temperatura del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115  $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250  $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520  $\mu\text{m}$ .

Realizado por: Autores

La Figura 3-16 y Figura 3-17, muestran los mapas de variación de la densidad y la temperatura respectivamente, mismas que presentan ligeros cambios en su contorno debido a la interacción del fluido con diferentes espesores de la capa de metalizado. Aunque se visualiza cambios en su contorno, sus valores numéricos pueden considerarse despreciables, por lo que se puede afirmar que estas propiedades se mantienen constantes.



**Figura 3-18:** Perfil de la velocidad del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115  $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250  $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520  $\mu\text{m}$ .

Realizado por: Autores

**Tabla 3-1:** Análisis de la variación del perfil de velocidad sobre diferentes espesores.

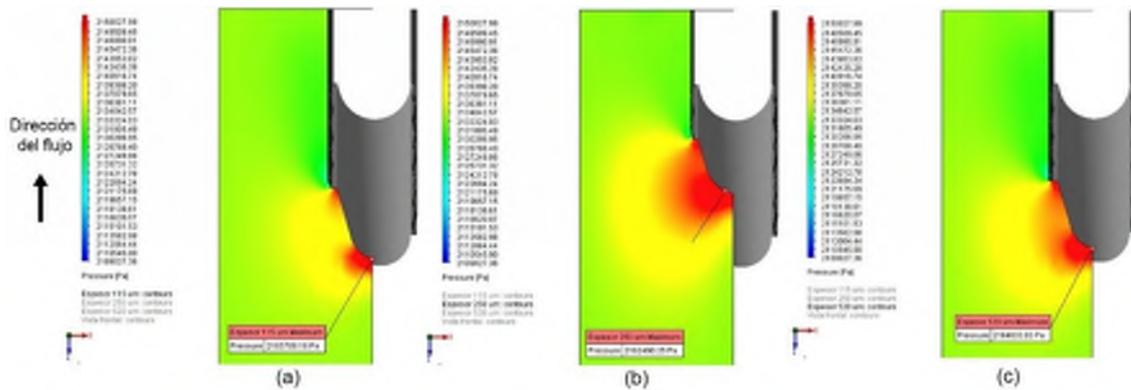
Zona de análisis	Espesor		
	115 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	520 $\mu\text{m}$
Ingreso al rodete	Velocidad constante aproximada de 8,3 m/s	Velocidad constante aproximada de 8 m/s	Velocidad constante aproximada de 8 m/s
Impacto con el borde de ataque	Descenso de la velocidad de 7 m/s a 2,8 m/s	Descenso de velocidad hasta los 4,8 m/s a 3,2 m/s	Descenso de velocidad en el rango de 4,8 m/s a 2,25 m/s
Recorrido sobre la curvatura del borde de ataque	Aumento gradual de velocidad hasta 6,4 m/s	Aumento gradual de la velocidad hasta 6 m/s	Aumento gradual de la velocidad hasta 6,4 m/s
Impacto con la capa de metalizado	La velocidad tiende a descender hasta un valor de 4 m/s	Descenso de velocidad hasta los 3,5 m/s	Descenso de velocidad desde 4,5 m/s a 2,5 m/s
Recorrido sobre la capa de metalizado	Velocidad creciente variable en el rango de 2,25 m/s hasta 7,7 m/s	Descenso abrupto en un rango de 3 m/s a 1 m/s	Descenso gradual de 2,5 m/s a 1 m/s y posterior aumento hasta 3,8 m/s

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

La Figura 3-18, muestra los cambios producidos en el perfil de velocidad del fluido generándose una mayor alteración del espectro en el punto en el que la capa de metalizado tiene mayor espesor (520  $\mu\text{m}$ ). Como característica general de los 3 puntos de análisis, se puede observar como la velocidad decrece mientras recorre la superficie de la probeta.

El valor promedio de velocidad máxima en los registros de velocidad entre los 3 escenarios es de 8.45 m/s, este valor se encuentra ubicado en la parte externa del contorno del perfil de velocidad, fuera de contacto con el álabe del rodete tal como se indica en la Tabla 3-1.



**Figura 3-19:** Perfil de la presión del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115  $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250  $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520  $\mu\text{m}$ .

**Realizado por:** Autores

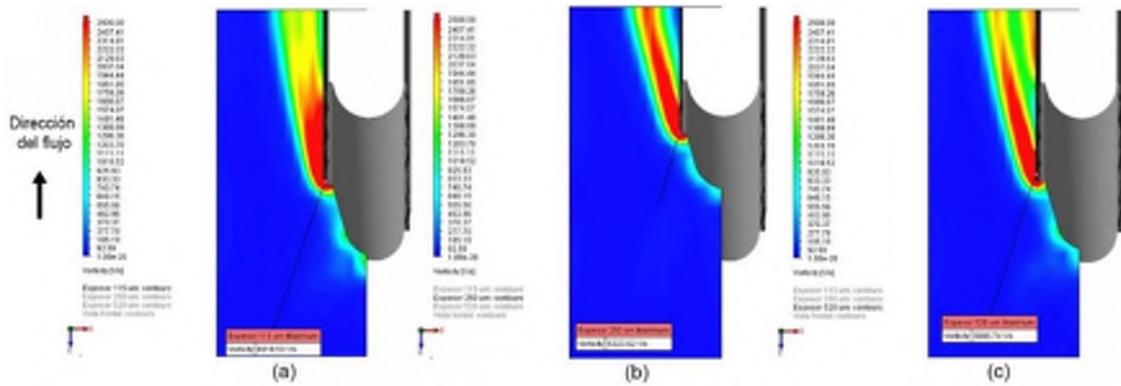
**Tabla 3-2:** Análisis de la variación del perfil de presión sobre diferentes espesores.

Zona de análisis	Espesor		
	115 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	520 $\mu\text{m}$
Ingreso al rodete	Presión constante de 2136334 [Pa]	Presión constante de 2136334 [Pa]	Presión constante de 2136334 [Pa]
Impacto con el borde de ataque	Aumento de presión a 2165708 [Pa]	Aumento progresivo de presión desde 2143615 [Pa] a 2162490 [Pa]	Aumento progresivo de presión desde 2143615 [Pa] a 2164633 [Pa]
Recorrido sobre la curvatura del borde de ataque	Descenso progresivo hasta 2143615 [Pa]	Descenso progresivo hasta 2141795 Pa	Descenso progresivo hasta 2147256 Pa
Impacto con la capa de metalizado	Descenso repentino de presión a 2121770 [Pa]	Descenso abrupto de presión hasta 2123590 [Pa]	Descenso abrupto hasta 2121770 [Pa]
Recorrido sobre la capa de metalizado	Aumento gradual de presión hasta 2134513 [Pa]	Aumento gradual de presión hasta 2138154 [Pa]	Descenso gradual de presión hasta 2130872 [Pa]

**Fuente:** Autores

**Realizado por:** Autores

Los valores de presión más altos se registran el lado de succión del borde de ataque del álabe, específicamente en el espesor de 520  $\mu\text{m}$  tal como lo indica la Figura 3-19. Estos cambios de presión se producen tanto en la zona del borde de ataque de la probeta donde el fluido toma caminos diferentes, así como en el cambio de sección por contacto en la capa de metalizado.



**Figura 3-20:** Perfil de vorticidad del fluido en el lado de succión sobre a) Un espesor de 115  $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250  $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520  $\mu\text{m}$ .

**Realizado por:** Autores

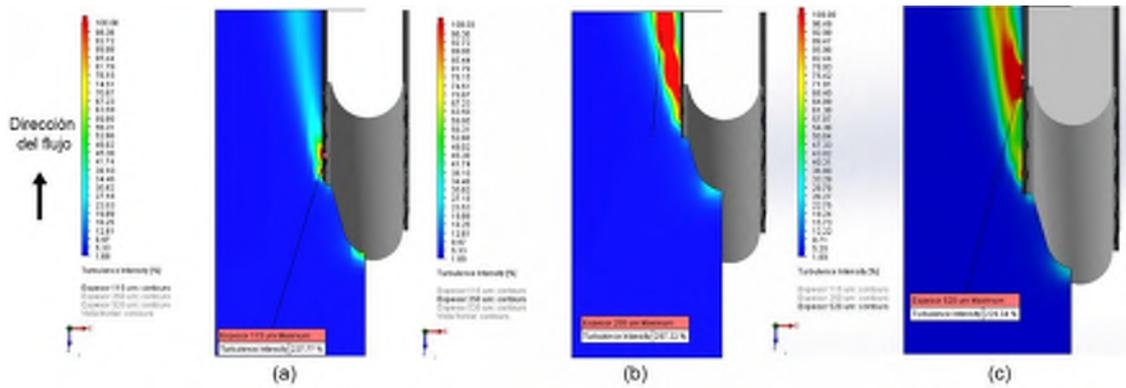
**Tabla 3-3:** Análisis de la variación del perfil de vorticidad sobre diferentes espesores.

Zona de análisis	Espesor		
	115 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	520 $\mu\text{m}$
Ingreso al rodete	No se detecta actividad	No se detecta actividad	No se detecta actividad
Impacto con el borde de ataque	Baja vorticidad en la zona con valores promedio de 1500 Hz	Se genera baja vorticidad con valor de 1714 Hz	Se genera baja vorticidad con valores promedio de 1500 Hz
Recorrido sobre la curvatura del borde de ataque	Descenso de vorticidad hasta 857 Hz	Se mantiene un valor aproximado de 1714 Hz	Descenso de la vorticidad hasta los 642 Hz
Impacto con la capa de metalizado	Aumento progresivo de actividad en el rango de 1928 Hz a 6918 Hz.	Aumento de vorticidad en un rango de 3000 Hz a 5142 Hz.	Aumento de vorticidad en un rango desde 3000 Hz hasta 5142 Hz.
Recorrido sobre la capa de metalizado	Descenso progresivo de actividad en el rango de 4500 Hz a 642 Hz.	Descenso de los niveles de vorticidad hasta los 214 Hz	Descenso progresivo de actividad en el rango de 4500 a 2142 Hz

**Fuente:** Autores

**Realizado por:** Autores

En la Figura 3-20, se puede observar que el punto más crítico de vorticidad aparece en la zona con menor espesor de la capa de metalizado (115  $\mu\text{m}$ ), mientras que en la capa de mayor espesor (520  $\mu\text{m}$ ) se puede apreciar un mayor despliegue en la estela de vorticidad generada tras el impacto del fluido con el metalizado.



**Figura 3-21:** Perfil de intensidad de turbulencia del fluido en el lado de succión sobre a) Un espesor de 115  $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250  $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520  $\mu\text{m}$ .

**Realizado por:** Autores

**Tabla 3-4:** Análisis de la variación de la intensidad de turbulencia sobre diferentes espesores.

Zona de análisis	Espesor		
	115 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	520 $\mu\text{m}$
Ingreso al rodete	Intensidad baja	Intensidad baja	Intensidad baja
Impacto con el borde de ataque	La intensidad aumenta hasta alcanzar un valor de 33,29%	La intensidad aumenta hasta alcanzar un valor de 33,29%	La intensidad aumenta hasta alcanzar un valor de 33,29%
Recorrido sobre la curvatura del borde de ataque	Descenso de la intensidad hasta 2,20%	Se mantiene un valor aproximado de 1714 Hz	Intensidad de turbulencia baja con valores de 8%
Impacto con la capa de metalizado	Se registra un aumento de la intensidad desde un 54% a su valor máximo de 237%	Aumenta la intensidad de turbulencia desde 50% hasta su valor máximo de 257%	La intensidad aumenta hasta alcanzar valores de 71%
Recorrido sobre la capa de metalizado	Descenso de la intensidad de la turbulencia hasta un 2%	La intensidad decrece progresivamente hasta un 60%	La intensidad de turbulencia se ve alterada con valores que oscilan entre 55% y 230%

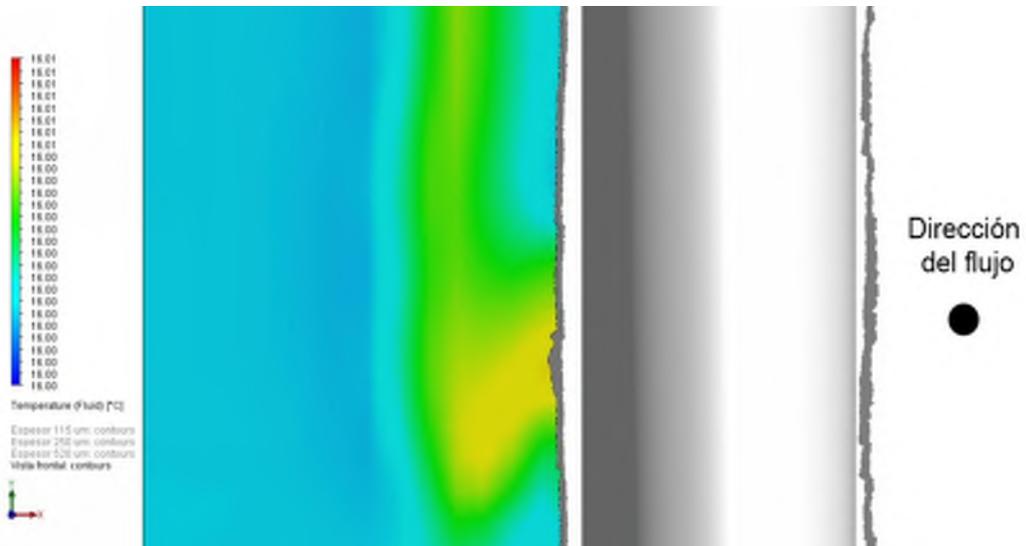
**Fuente:** Autores

**Realizado por:** Autores

En la Figura 3-21, se puede apreciar que la intensidad de turbulencia crece en la zona de interacción del fluido con la capa de metalizado. Basados en los resultados obtenidos se puede asegurar que el impacto de la turbulencia es directamente proporcional al aumento del espesor. Con un espesor de 115  $\mu\text{m}$  la estela de turbulencia se genera de manera puntual en la capa de metalizado, es de dimensiones pequeñas sin mucha difusión. A su vez con un espesor de 250  $\mu\text{m}$  la estela de turbulencia toma una forma prolongada tras el impacto manteniendo valores máximos

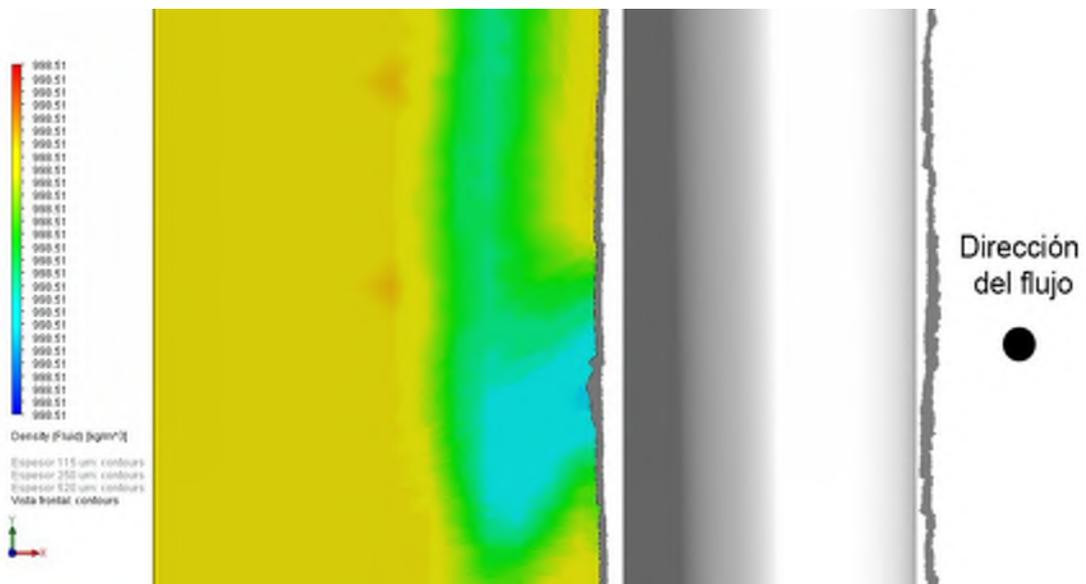
constantes a lo largo de esta, mientras que con un espesor de 520  $\mu\text{m}$  la estela se difunde a lo largo de la capa de metalizado.

### 3.5.1.2. Perfil del fluido en vista perpendicular a su dirección de desplazamiento.



**Figura 3-22:** Perfil de temperatura del fluido sobre una variación de espesor en la capa de metalizado.

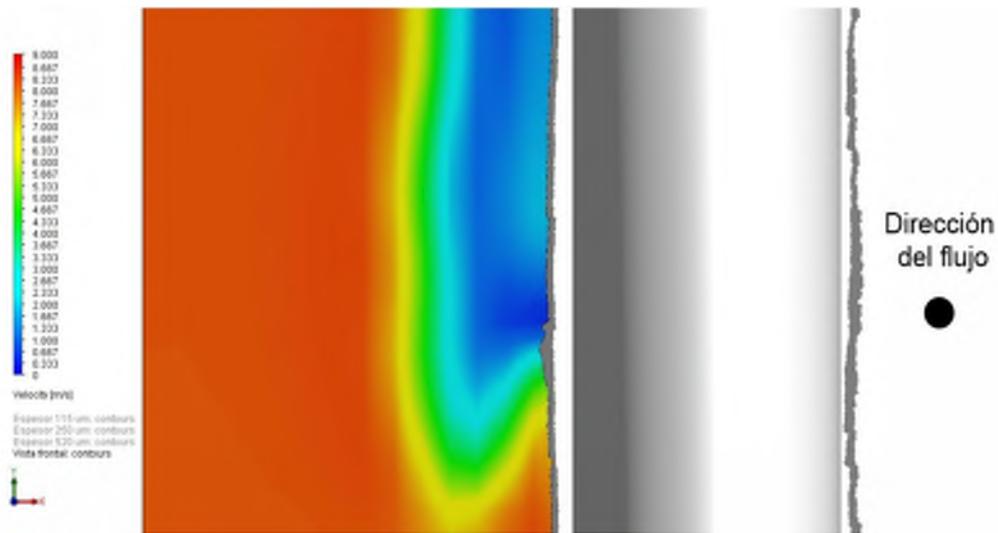
Realizado por: Autores



**Figura 3-23:** Perfil de la densidad del fluido sobre un sector de espesor variable en la capa de metalizado.

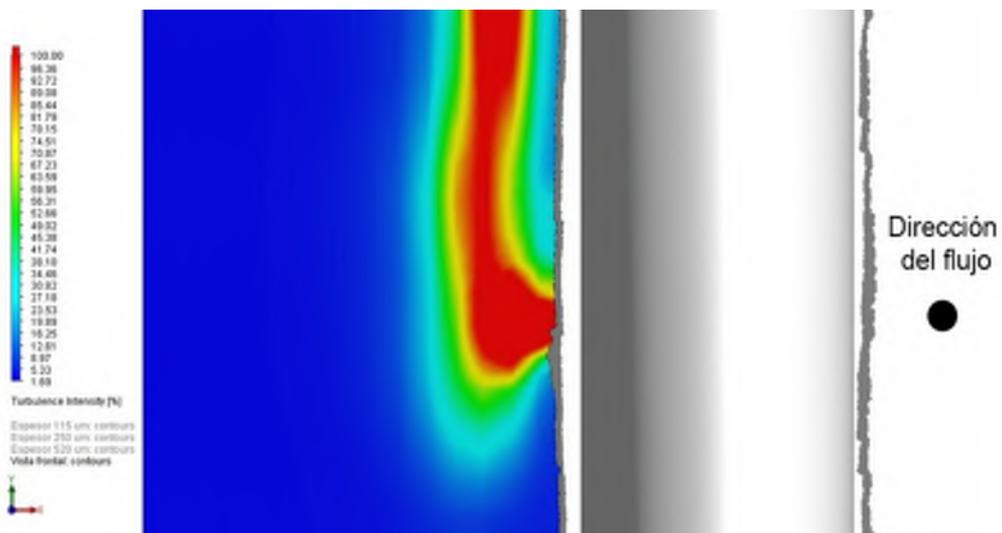
Realizado por: Autores

En la Figura 3-22, Figura 3-23 y Figura 3-24, se puede visualizar los resultados de la simulación desde un plano perpendicular a la trayectoria del fluido, se puede observar su comportamiento cuando este se encuentra ante un cambio de sección brusco en la capa de metalizado. Tal como lo describe la imagen en la zona de mayor espesor se forma una especie de ojo sobre el que se producen cambios en las propiedades del fluido. Descendiendo sus valores a medida que se acerca al centro del contorno formado.



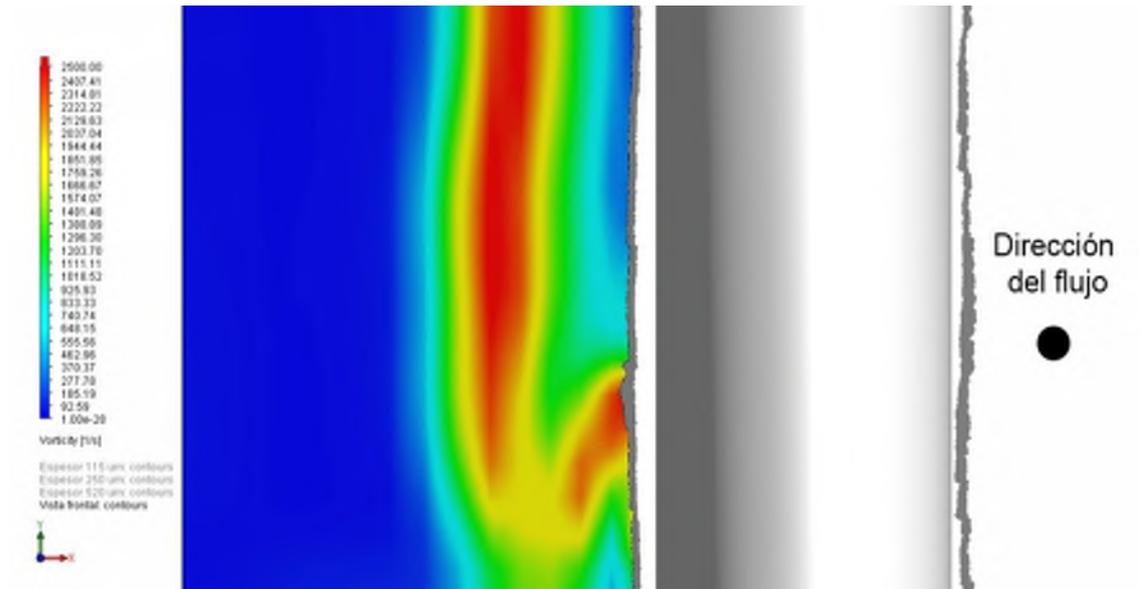
**Figura 3-24:** Perfil de velocidad del fluido sobre un sector de espesor variable en la capa de metalizado.

Realizado por: Autores



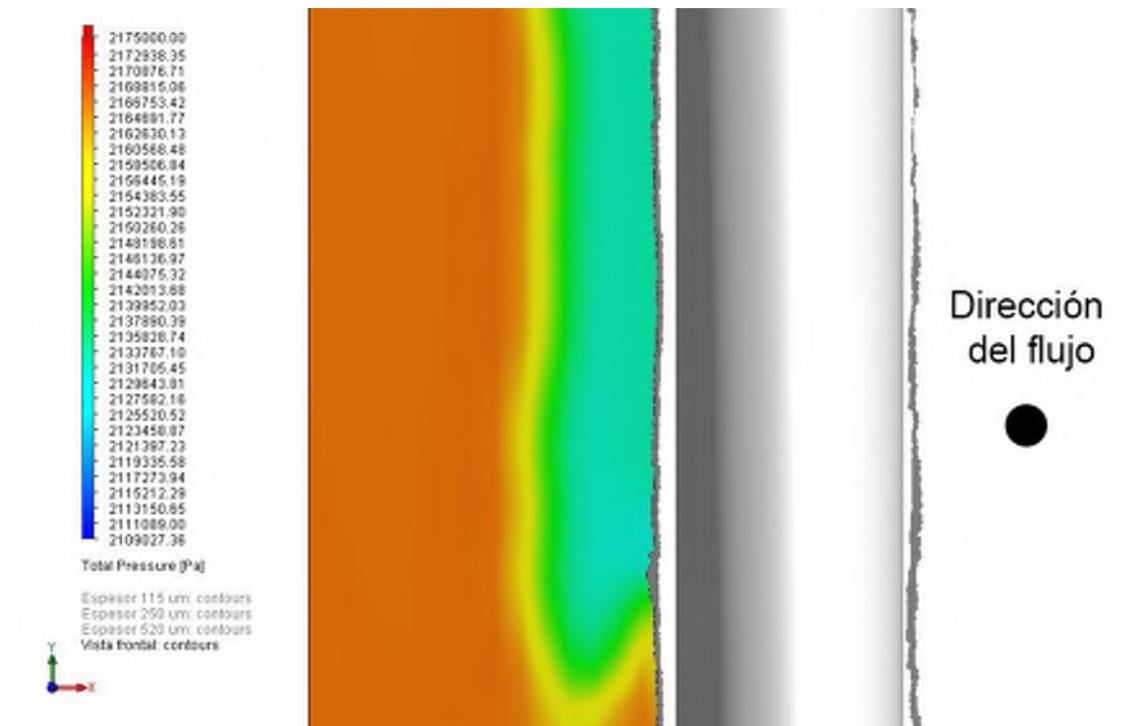
**Figura 3-25:** Perfil de la intensidad de turbulencia del fluido sobre un sector de espesor variable en la capa de metalizado.

Realizado por: Autores



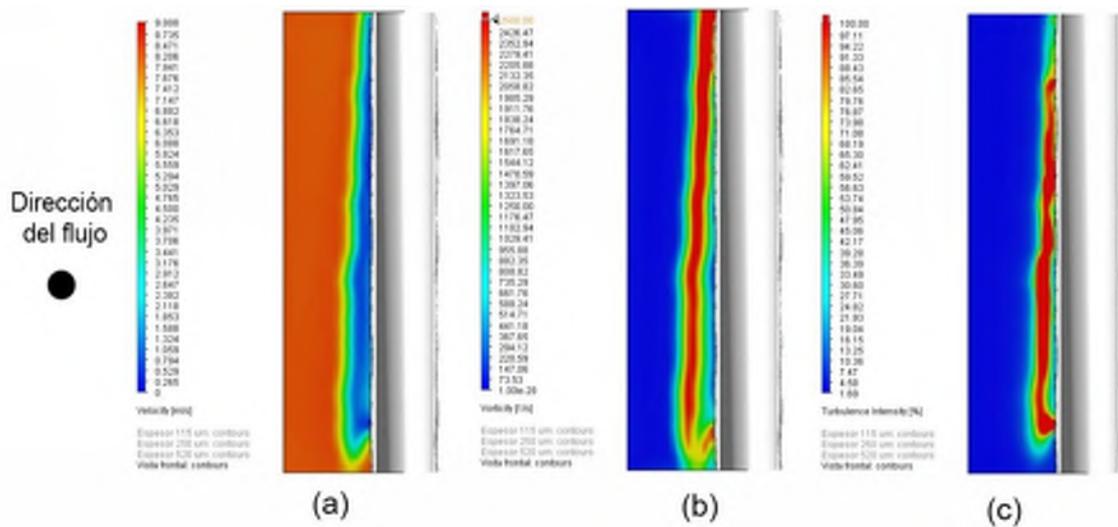
**Figura 3-26:** Perfil de la vorticidad del fluido sobre un sector de espesor variable en la capa de metalizado.

Realizado por: Autores



**Figura 3-27:** Perfil de la presión del fluido sobre un sector de espesor variable en la capa de metalizado.

Realizado por: Autores



**Figura 3-28:** Comportamiento del fluido visto a lo largo del corte perpendicular a la dirección del flujo. a) Velocidad. b) Vorticidad) c) Intensidad de turbulencia.

**Realizado por:** Autores

La Figura 3-25, muestra como varía la intensidad de la turbulencia del fluido ante el cambio de espesor. Cuando el fluido impacta con el espesor de  $520\ \mu\text{m}$  se forma una zona de alta turbulencia, misma que se prolonga de forma perpendicular a la dirección de ingreso del fluido y disipa de manera gradual por los alrededores de la zona de impacto.

La Figura 3-26, Figura 3-27 y Figura 3-28, nos proporcionan una idea más clara de cómo se comporta el fluido cuando encuentra en su camino grandes cambios de sección.

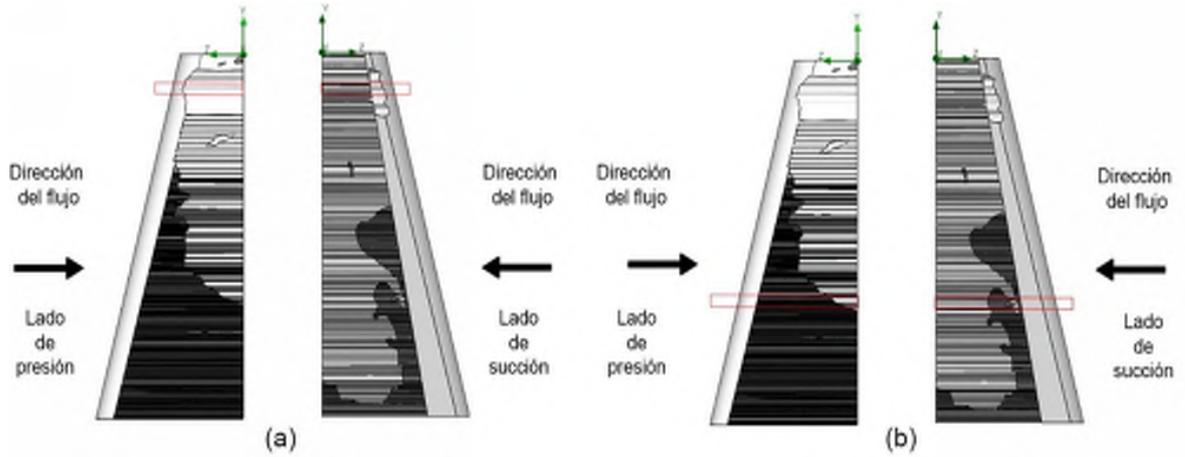
En el caso de la velocidad esta tiende a descender de forma abrupta a la vez que se genera un incremento en la presión y un aumento en la aparición de vórtices que se distribuyen a lo largo de las zonas cercanas a la capa de metalizado.

Se puede observar como los cambios de estas propiedades del fluido comprometen todo el contorno de la capa de metalizado abrazándola por completo.

### 3.5.2. *Probeta con desgaste en la capa de metalizado y metal base*

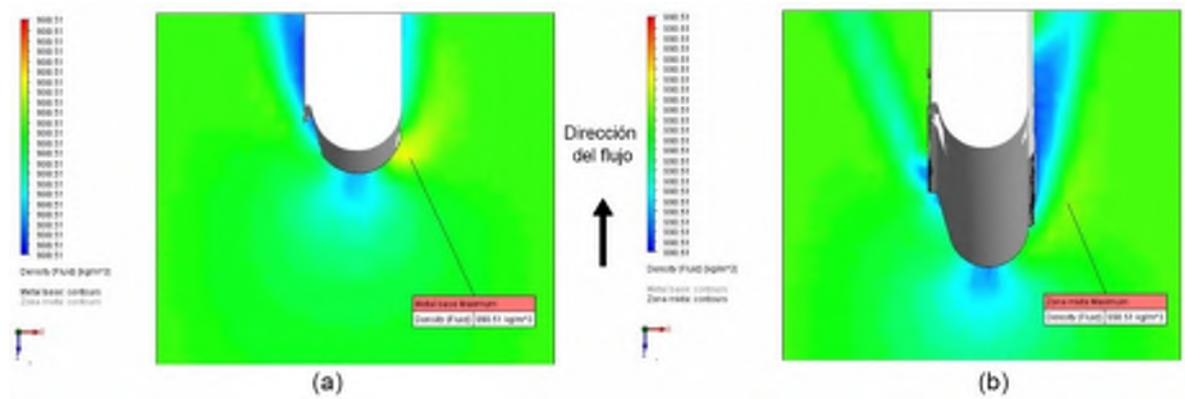
#### 3.5.2.1. *Comportamiento del fluido en interacción con el metal base y la zona mixta.*

La Figura 4-29 indica las zonas de la probeta que serán analizadas en la simulación.



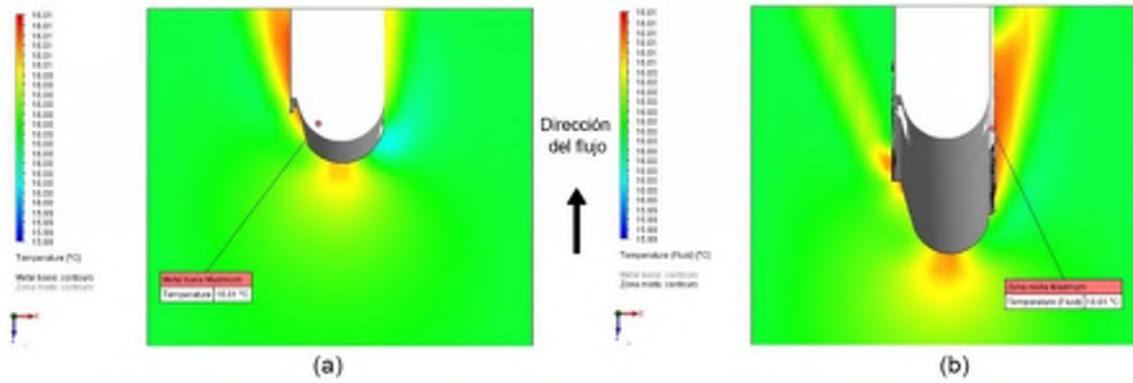
**Figura 3-29:** Zonas de análisis en la probeta con desgaste superficial. a) Metal base b) Zona de convergencia entre el metal base y la capa de metalizado.

Realizado por: Autores



**Figura 3-30:** Perfil de densidad del fluido en diferentes zonas de la probeta. a) Metal base. b) Zona de convergencia.

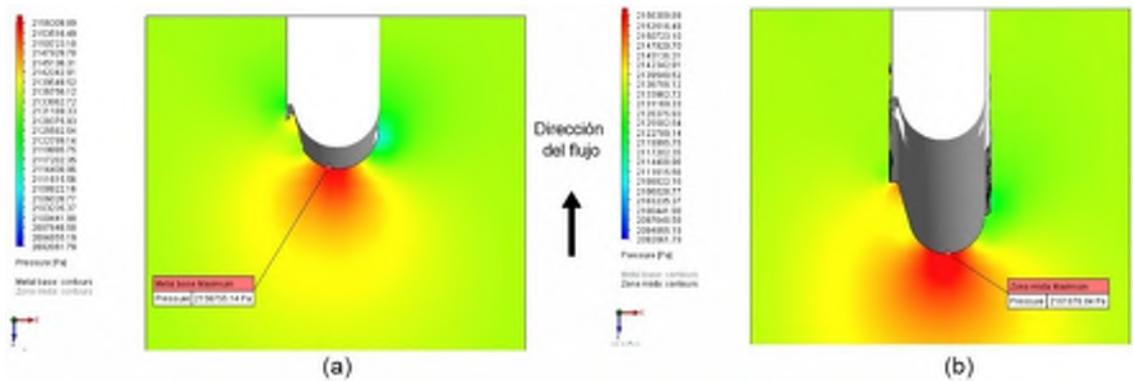
Realizado por: Autores



**Figura 3-31:** Perfil de temperatura del fluido en diferentes zonas de la probeta. a) Metal base.  
b) Zona de convergencia.

**Realizado por:** Autores

En la Figura 3-30 y Figura 3-31, se puede observar que a pesar de que los perfiles de densidad y temperatura del fluido sufren variaciones en sus valores, estos cambios son mínimos por lo que se puede considerar que dichas propiedades permanecen constantes a lo largo de su trayectoria.



**Figura 3-32:** Perfil de presión del fluido en diferentes zonas de la probeta. a) Metal base. b) Zona de convergencia.

**Realizado por:** Autores

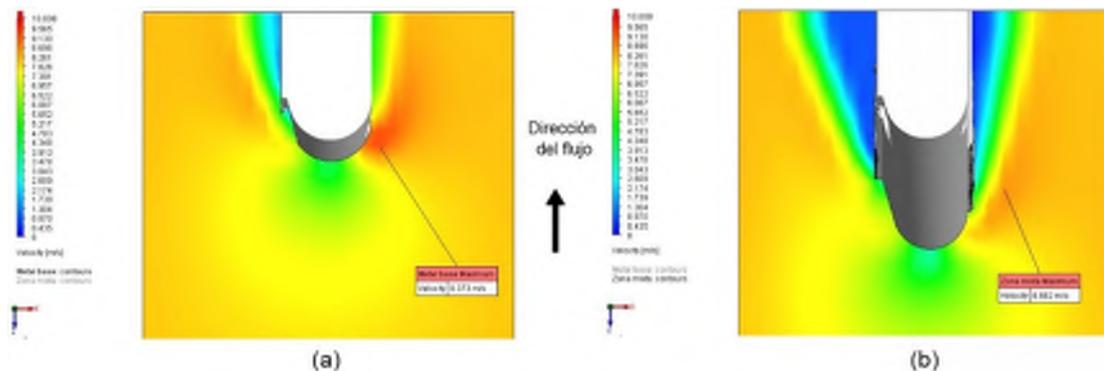
La Figura 3-32 junto con la Tabla 3-5 detalla el comportamiento del perfil de presión del fluido cuando este impacta con el borde de ataque de la probeta indicando las zonas en las que se genera un aumento considerable de la presión. En este caso la máxima presión se registra al momento del impacto del fluido con la probeta para posteriormente descender en sus valores

**Tabla 3-5:** Análisis de la variación de presión en la probeta con desgaste superficial

Zona de análisis	Zona de interacción	
	Metal base	Zona mixta
Ingreso al rodete	Presión constante de 2125582 [Pa]	Presión constante de 2125582 [Pa]
Impacto con el borde de ataque	La presión se eleva a su punto máximo de 2156755 [Pa]	La presión se eleva a su punto máximo de 2156309 [Pa]
Recorrido sobre la curvatura del borde de ataque	Descenso de la presión hasta 2131169 [Pa]	La presión varía de 2131169 [Pa] a 2147929 [Pa]
Impacto con la capa de metal base/metalizado	La presión sufre un aumento hasta 2142342 [Pa]	La presión se eleva a 2150723 [Pa]
Recorrido sobre la capa de metal base/metalizado	La presión sufre un descenso progresivo hasta 2122789 [Pa]	La presión desciende progresivamente hasta 2119995 [Pa]

Fuente: Autores

Realizado por: Autores



**Figura 3-33:** Perfil de velocidad del fluido en diferentes zonas de la probeta. a) Metal base. b) Zona de convergencia.

Realizado por: Autores

La Figura 3-33, permite observar el comportamiento del perfil de velocidad. En la zona de interacción con el metal base este tiende a disminuir su velocidad cuando impacta con la probeta y decrece aún más cuando se encuentra en su camino con fallas producto de la erosión del material. En el caso de la interacción con la zona de convergencia la velocidad disminuye considerablemente cuando el fluido impacta con la capa de metalizado, teniendo sus valores más bajos cuando el fluido recorre con la superficie del metalizado como lo indica la Tabla 3-6.

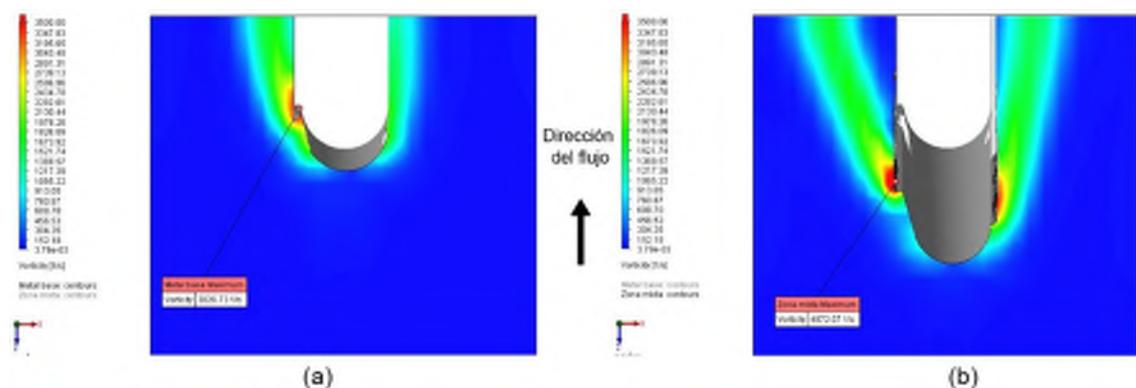
**Tabla 3-6:** Análisis de variación de velocidad en la probeta con desgaste superficial.

Zona de análisis	Zona de interacción	
	Metal base	Zona mixta
Ingreso al rodete	Velocidad constante de 8,2 m/s	Velocidad constante de 8,2 m/s
Impacto con el borde de ataque	La velocidad sufre un descenso hasta 5,65 m/s	La velocidad se encuentra en un rango de 5,217 m/s a 3,043 m/s
Recorrido sobre la curvatura del borde de ataque	La velocidad decrece progresivamente hasta 3 m/s	La velocidad crece y se mantiene constante a 7,826 m/s
Impacto con la capa de metal base/metalizado	Aumento de velocidad hasta 6 m/s en su lado succión y aproximadamente 9,130 m/s en su lado de presión.	Existe un incremento de velocidad hasta 6,522 m/s
Recorrido sobre la capa de metal base/metalizado	La velocidad disminuye nuevamente cayendo hasta 1 m/s en su lado de succión y 5,652 m/s en su lado de presión.	La velocidad desciende hasta 1 m/s

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

La Figura 3-34, revela las zonas que por su geometría son más propensas a generar vorticidad. En el caso del análisis en la zona de metal base, se observa que una alta vorticidad es generada cuando el fluido encuentra en su camino grandes cambios de sección, en este caso secciones generadas por el desgaste propio de material por la erosión. Mientras en el caso de la zona de convergencia entre el metal base y la capa de metalizado, se puede observar que la mayor variación de vorticidad se produce cuando el fluido se encuentra con la geometría propia del metalizado, misma que tiende a generar y disipar estelas pronunciadas de vórtices a lo largo del álabe tal como lo detalla la Tabla 4-7.



**Figura 3-34:** Perfil de vorticidad del fluido en diferentes zonas de la probeta. a) Metal base. b) Zona de convergencia.

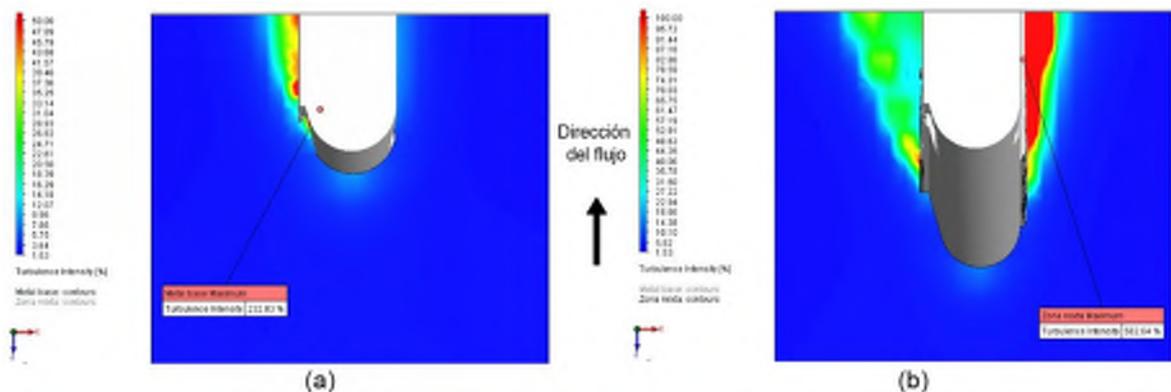
Realizado por: Autores

**Tabla 3-7:** Análisis de la vorticidad y sus cambios sobre la probeta con desgaste superficial.

Zona de análisis	Zona de interacción	
	Metal base	Zona mixta
Ingreso al rodete	No se detecta actividad	No se detecta actividad
Impacto con el borde de ataque	La actividad de la vorticidad es baja con valores de 456 Hz	La actividad de la vorticidad es baja con valores de 456 Hz
Recorrido sobre la curvatura del borde de ataque	La vorticidad aumenta hasta 1978 Hz aproximadamente	En su lado de succión la vorticidad varía entre 456 Hz y 2130 Hz mientras en su lado de presión se mantiene en 2130 Hz
Impacto con la capa de metal base/metalizado	En su lado de succión se genera una vorticidad máxima de 3826 Hz debido a un cambio de sección. El lado de presión se mantiene a 1978 Hz	Se generan picos máximos con valores aproximados de 3700 Hz
Recorrido sobre la capa de metal base/metalizado	La vorticidad decrece en su lado de succión hasta los 1065 Hz mientras el lado de presión continua con vorticidad de 1978 Hz	En su lado de succión la vorticidad desciende hasta los 152 Hz mientras en su lado de presión va entre los 2282 Hz a los 304 Hz.

Fuente: Autores

Realizado por: Autores



**Figura 3-35:** Perfil de intensidad de turbulencia del fluido en diferentes zonas de la probeta. a) Metal base. b) Zona de convergencia.

Realizado por: Autores

**Tabla 3-8:** Análisis de la variación de la intensidad de turbulencia en la probeta con desgaste superficial.

Zona de análisis	Zona de interacción	
	Metal base	Zona mixta
Ingreso al rodete	No se detecta actividad	No se detecta actividad
Impacto con el borde de ataque	La intensidad de turbulencia es baja con valores de 7%	La intensidad de turbulencia es baja con valores de 22%
Recorrido sobre la curvatura del borde de ataque	La intensidad aumenta alcanzando un pico aproximado de 40% en el lado de succión mientras en el lado de presión se mantiene en 5%	La intensidad desciende en ambos lados con valores de 6%
Impacto con la capa de metal base/metalizado	En el lado de succión la intensidad alcanza un valor de 30% mientras en su lado de presión la intensidad es baja.	En el lado de succión la intensidad se genera con un valor de 78% mientras en su lado de presión su valor se dispara a 110%
Recorrido sobre la capa de metal base/metalizado	En su lado de succión la intensidad aumenta manteniendo valores entre 200% y 46% mientras en su lado de presión se mantiene en 5%	En su lado de succión la intensidad tiende a descender progresivamente con valores entre 75% a 31% mientras en su lado de presión la intensidad crece hasta valores mayores de 100%

**Fuente:** Autores

**Realizado por:** Autores

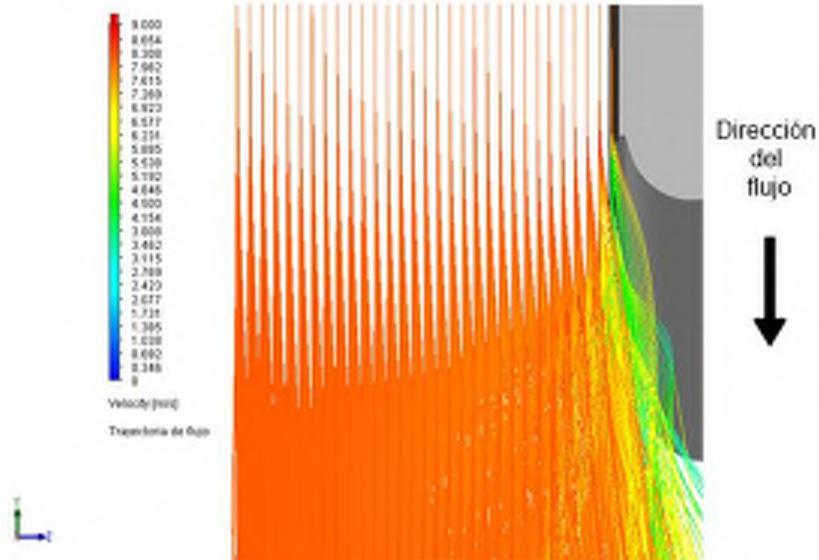
Analizando la Figura 3-35 junto con la Tabla 3-8, permiten observar que la intensidad de la turbulencia tiene sus picos más altos en las zonas en las que el fluido tiene contacto directo con la geometría de la capa de metalizado, sumado a los diferentes espesores propios de la capa de metalizado y la erosión producida sobre el metal base. Esto por ejemplo ayuda a que la intensidad de la turbulencia sea prolongada en ciertos sectores, como sucede en el lado de succión de la probeta.

Este fenómeno puede originarse debido a que el fluido cambia su sentido de movilidad al impactar con los álabes del rodete, lo que produce que la intensidad de la turbulencia sea relativamente alta en la zona de impacto con relación al lado de succión del álabe.

Una elevada y constante acción de la turbulencia en esta zona ya erosionada provocaría una aceleración en el desgaste del elemento.

### 3.6. Comportamiento del fluido en la zona de descarga del rodete.

#### 3.6.1. *Probeta sin desgaste en la capa de metalizado*

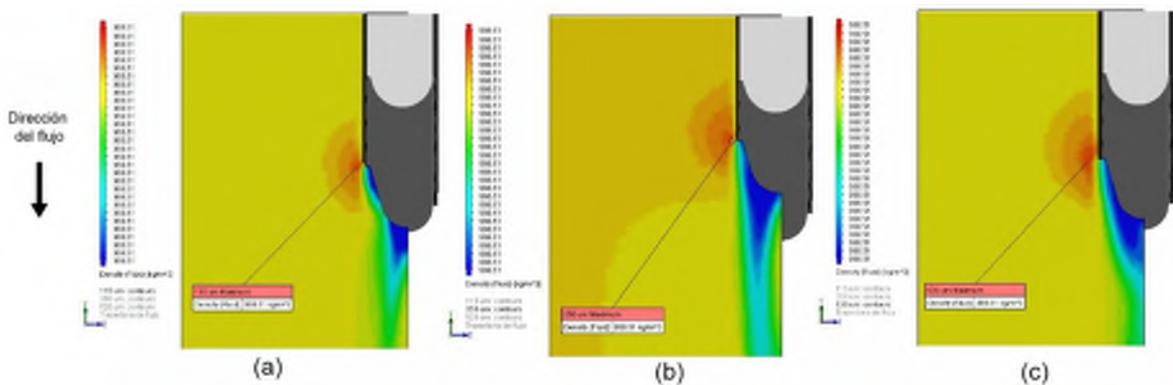


**Figura 3-36:** Trayectoria del fluido en la zona de descarga.

Realizado por: Autores

En este escenario de simulación se obtuvieron resultados satisfactorios, a diferencia del segundo escenario el fluido abandona la probeta teniendo su última zona de contacto con el borde de salida de esta tal como lo indica la Figura 3-36.

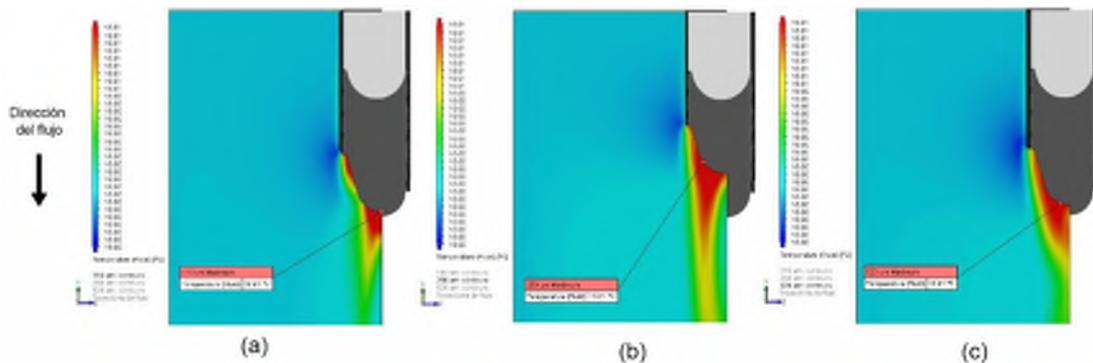
#### 3.6.1.1. *Comportamiento del fluido sobre diferentes espesores de la capa de metalizado.*



**Figura 3-37:** Perfil de densidad del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115  $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250  $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520  $\mu\text{m}$ .

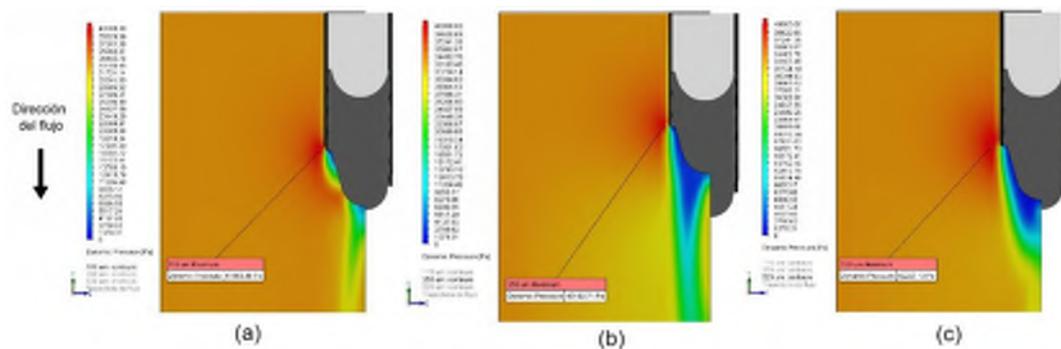
Realizado por: Autores

La Figura 3-37 y Figura 3-38, permiten observar que a la salida de rodete en la parte final del álabe las propiedades de Densidad y Temperatura permanecen constantes a lo largo del recorrido de la capa de metalizado hasta que se encuentran con la curvatura del álabe en donde por condiciones de geometría dichas propiedades cambian en sus valores de una manera mínima como lo muestra el mapa de contorno. Al ser una variación tan pequeña se la puede considerar despreciable y asumir que la densidad y la temperatura permanecen constantes a lo largo de este trayecto.



**Figura 3-38:** Perfil de temperatura del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115  $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250  $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520  $\mu\text{m}$ .

Realizado por: Autores



**Figura 3-39:** Perfil de presión del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115  $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250  $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520  $\mu\text{m}$ .

Realizado por: Autores

La Figura 3-39 y la Tabla 3-9, muestran que el perfil de presión tiene sus picos más altos en las zonas en las que el fluido encuentra un cambio de sección importante en su trayecto, de esa manera, ocurre en la región en la que la capa de metalizado finaliza. Sobre un mayor espesor se concentra una presión ligeramente superior, así mismo la geometría de la probeta provoca una estela cuando el fluido la abandona descendiendo el valor de la presión, misma que disminuye

progresivamente cuando el fluido regresa a transitar libremente sin contacto con otro sólido, generando así la llamada presión de vacío.

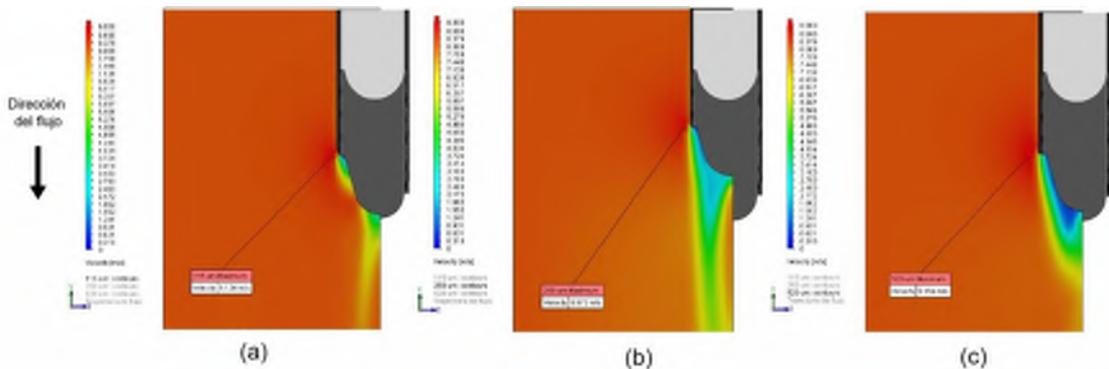
**Tabla 3-9:** Análisis del perfil de presión en la probeta sin desgaste superficial ubicada en la salida del rodete.

Zona de análisis	Espesor		
	115 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	520 $\mu\text{m}$
Recorrido del fluido sobre la capa de metalizado	Presión constante aproximada de 32857 [Pa]	Presión constante aproximada de 32857 [Pa]	Presión constante aproximada de 32857 [Pa]
Cambio de espesor entre el metalizado y el metal base.	Pico de presión de 41563 [Pa] con descenso hasta 12857 [Pa]	Pico de presión de 40192 [Pa] con descenso hasta 7142 [Pa]	Pico de presión de 42207 [Pa] con descenso hasta 7142 [Pa]
Recorrido sobre la curvatura del borde de la probeta	Variación de presión en el rango de 5714 [Pa] a 12857 [Pa]	Variación de presión en el rango de 4285 [Pa] a 8571 [Pa]	Caída de presión a 2857 [Pa]
Trayecto libre del fluido tras abandonar la probeta	Ascenso progresivo de la presión en el rango de 7142 [Pa] a 30000 [Pa]	Ascenso progresivo de la presión en el rango de 10000 [Pa] a 22857 [Pa]	Ascenso progresivo de la presión en el rango de 10000 [Pa] a 31000 [Pa]

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

En La Figura 3-40 y la Tabla 3-10, observamos que los picos más altos de velocidad se generan cuando el fluido encuentra cambios de sección en su trayectoria, ocurre en la zona en la que la capa de metalizado finaliza y da paso al metal base. Así mismo la geometría de la probeta provoca una estela cuando el fluido la abandona descendiendo el valor de la velocidad y aumenta progresivamente cuando el fluido regresa a transitar libremente sin contacto con otro sólido.



**Figura 3-40:** Perfil de velocidad del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115  $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250  $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520  $\mu\text{m}$ .

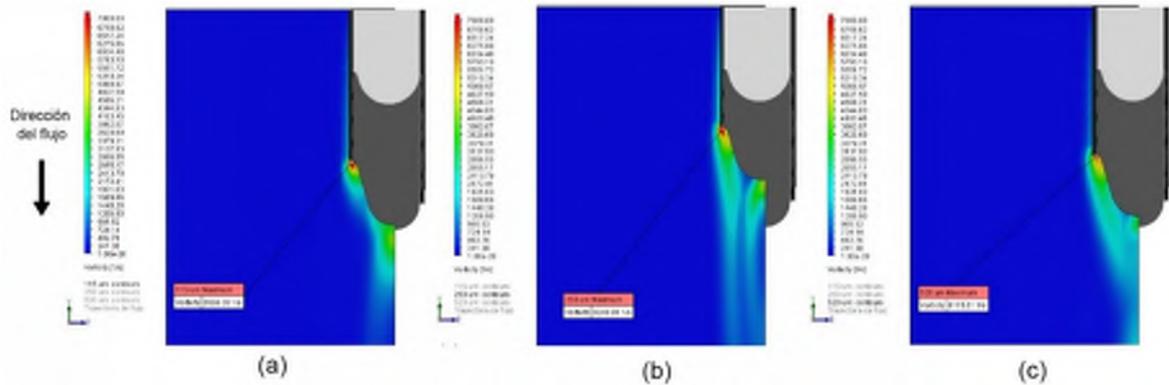
Realizado por: Autores

**Tabla 3-10:** Análisis de la variación de velocidad en la zona de salida del rodete sobre la probeta sin desgaste superficial.

Zona de análisis	Espesor		
	115 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	520 $\mu\text{m}$
Recorrido del fluido sobre la capa de metalizado	Velocidad constante aproximada de 8,5 m/s	Velocidad constante aproximada de 8.67 m/s	Velocidad constante aproximada de 8,67 m/s
Cambio de espesor entre el metalizado y el metal base.	Pico de velocidad de 9,124 m/s con descenso hasta 3,5 m/s	Pico de velocidad de 8.972 m/s con descenso hasta 3,5 m/s	Pico de velocidad de 9,194 m/s con descenso hasta 2,5 m/s
Recorrido sobre la curvatura del borde de la probeta	Variación de velocidad en el rango de 5,5 m/s a 3 m/s	Variación de velocidad en el rango de 1 m/s a 3,2 m/s	Variación de velocidad en el rango de 1 m/s a 2,2 m/s
Trayecto libre del fluido tras abandonar la probeta	Ascenso progresivo de la velocidad en el rango de 3 m/s a 7 m/s	Ascenso progresivo de la velocidad en el rango de 4,8 m/s a 7 m/s	Ascenso progresivo de la velocidad en el rango de 2,5 m/s a 6,7 m/s

Fuente: Autores

Realizado por: Autores



**Figura 3-41:** Perfil de vorticidad del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115  $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250  $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520  $\mu\text{m}$ .

Realizado por: Autores

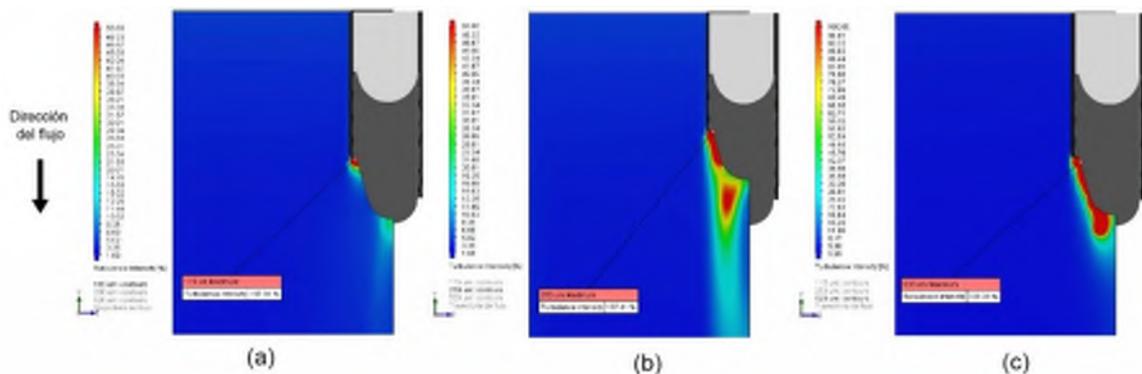
**Tabla 3-11:** Análisis de la variación de la vorticidad en la probeta sin desgaste superficial ubicada en la salida del rodete.

Zona de análisis	Espesor		
	115 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	520 $\mu\text{m}$
Recorrido del fluido sobre la capa de metalizado	Baja actividad de vórtices con valores de 1500 Hz	Baja actividad de vórtices con valores de 1500 Hz	Baja actividad de vórtices con valores de 1500 Hz
Cambio de espesor entre el metalizado y el metal base.	Pico de vorticidad de 8569 Hz	Pico de vorticidad de 8249 Hz	Pico de vorticidad de 6115 Hz
Recorrido sobre la curvatura del borde de la probeta	Vorticidad variable en el rango de 5250 Hz a 3500 Hz	Vorticidad variable en el rango de 5250 Hz a 4500 Hz	Vorticidad variable en el rango de 5250 Hz a 2250 Hz
Trayecto libre del fluido tras abandonar la probeta	Descenso progresivo en la vorticidad en el rango de 3500 Hz a 1000 Hz	Descenso progresivo en la vorticidad en el rango de 4000 Hz a 250 Hz	Descenso progresivo en la vorticidad en el rango de 3250 Hz a 1250 Hz

Fuente: Autores

Realizado por: Autores.

La Figura 3-41, permite observar que los picos de vorticidad se generan en los cambios de sección generados entre la capa de metalizado y el metal base. En este caso el pico más alto se registra en la capa de metalizado con menor espesor (115  $\mu\text{m}$ ) así como se indica en la Tabla 3-11.



**Figura 3-42:** Perfil de intensidad de turbulencia del fluido en el lado de succión sobre. a) Un espesor de 115  $\mu\text{m}$ . b) Un espesor de 250  $\mu\text{m}$ . c) Un espesor de 520  $\mu\text{m}$ .

Realizado por: Autores

**Tabla 3-12:** Análisis de la variación de la intensidad de turbulencia sobre la probeta sin desgaste superficial ubicada en la salida del rodete.

Zona de análisis	Espesor		
	115 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	520 $\mu\text{m}$
Recorrido del fluido sobre la capa de metalizado	No se registra actividad	No se registra actividad	No se registra actividad
Cambio de espesor entre el metalizado y el metal base.	Pico de turbulencia con un valor de 187%	Pico de turbulencia con un valor de 187,41%	Pico de turbulencia con un valor de 238%
Recorrido sobre la curvatura del borde de la probeta	Variación de en la intensidad de turbulencia en el rango de 41% a 16%	Variación en la intensidad de turbulencia en el rango de 187,41% a 31%	Intensidad de turbulencia constante con un valor de 238%
Trayecto libre del fluido tras abandonar la probeta	Descenso progresivo de la turbulencia en el rango de 19% a 7%	Descenso progresivo de la turbulencia desde 32% a 13%	Descenso progresivo de la turbulencia desde 50% a 10%

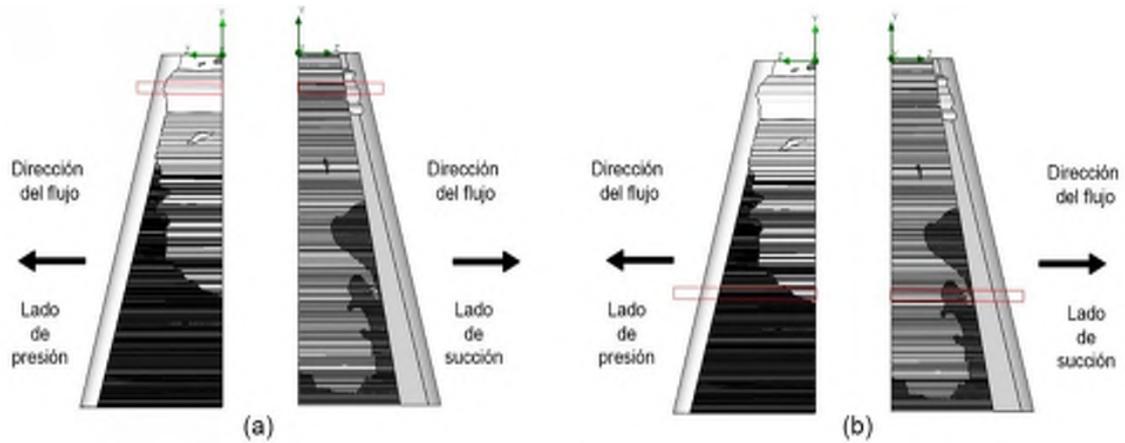
**Fuente:** Autores

**Realizado por:** Autores

Observando la Figura 3-42 junto con la Tabla 3-12, se aprecia con claridad las zonas más propensas a generar que el fluido aumente su nivel de turbulencia. En este caso los picos de la intensidad de turbulencia se generaron en los cambios de sección entre el metalizado y el metal base. Además, se puede visualizar que a mayor espesor de capa de metalizado mayor será la intensidad de la turbulencia generada, así como la estela que esta genera en el contorno de la probeta.

### 3.6.2. *Probeta con desgaste en la capa de metalizado*

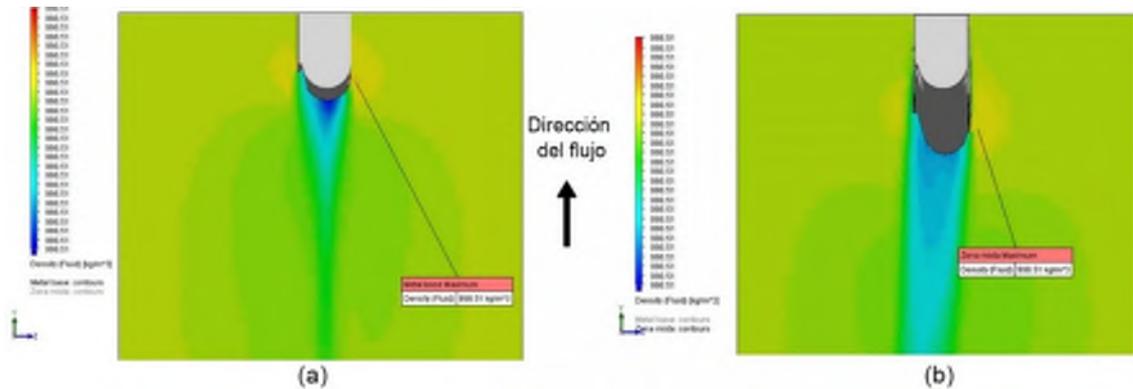
#### 3.6.2.1. *Comportamiento del fluido en interacción con el metal base y la zona mixta.*



**Figura 3-43:** Zonas de análisis en la probeta con desgaste superficial a la salida del rodete. a) Metal base b) Zona de convergencia entre el metal base y la capa de metalizado.

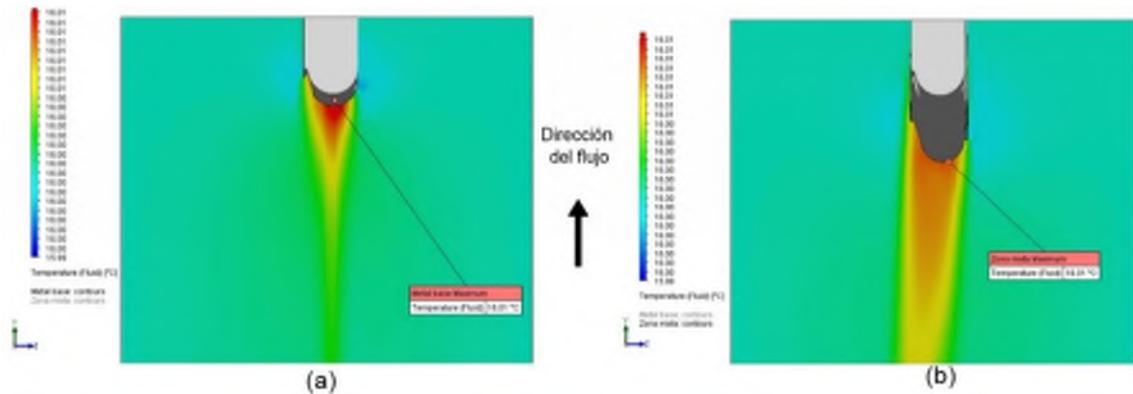
**Realizado por:** Autores

El análisis se lo realizó en zonas específicas de la probeta en las que el desgaste tanto del metal base como en la zona de metalizado se encuentren en un grado avanzado y puedan resultar influyentes en el comportamiento del fluido cuando este atraviesa por estas regiones como se puede observar en la Figura 3-43.



**Figura 3-44:** Perfil de densidad del fluido. a) Metal base. b) Zona de convergencia metal base con la capa de metalizado.

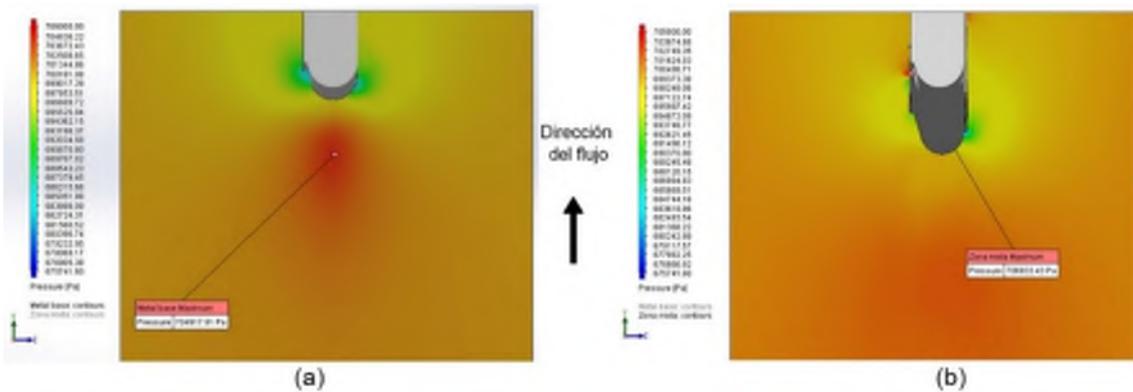
**Realizado por:** Autores



**Figura 3-45:** Perfil de temperatura del fluido. a) Metal base. b) Zona de convergencia metal base con la capa de metalizado.

**Realizado por:** Autores

En la Figura 3-44 y Figura 3-45, se puede observar que los valores de la densidad y temperatura se ven afectados cuando el fluido abandona la superficie de la probeta. Sin embargo, estos cambios al ser demasiado pequeños pueden considerarse como despreciables, considerando que las propiedades de temperatura y densidad permanecen constantes a lo largo del trayecto.



**Figura 3-46:** Perfil de presión del fluido. a) Metal base. b) Zona de convergencia metal base con la capa de metalizado.

**Realizado por:** Autores

La Figura 3-46 y Tabla 3-13, permiten observar las zonas en las cuales la presión presenta sus picos más altos. En el caso de la zona interacción con el metal base el valor máximo se produce en la zona baja de la probeta mientras en la zona de interacción del fluido con la zona mixta se registró un valor máximo de 706833 [Pa] en la región en la que existe un cambio constante de sección entre la capa de metalizado y el metal base debido al desgaste presente. Así mismo se puede observar que cuando el fluido entra en contacto con la curvatura de la probeta se producen caídas en los valores de presión que pueden ser factores que intervengan en la formación de

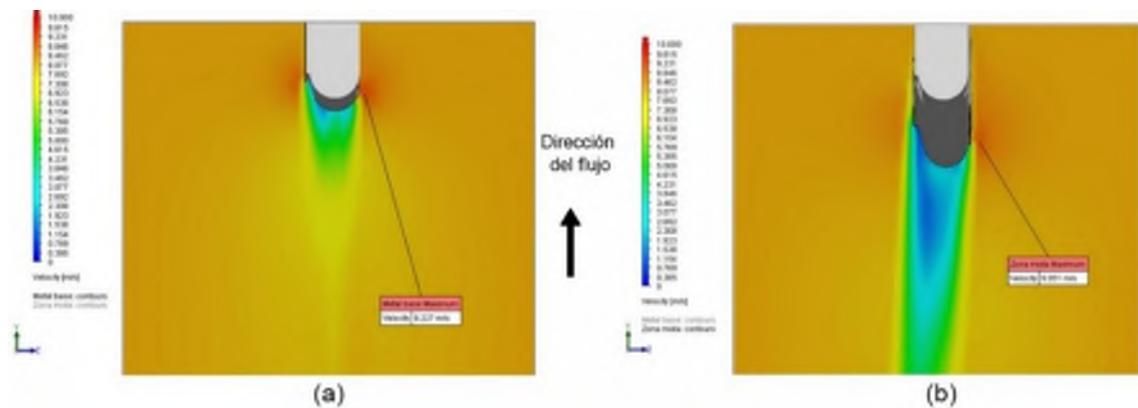
cavitación. Un cambio de sección influye directamente en la disminución de los valores de la presión tanto en la zona del metal base como en la zona de convergencia.

**Tabla 3-13:** Análisis de la variación de presión en la probeta con desgaste superficial ubicada en la salida del rodete.

Zona de análisis	Zona de interacción	
	Metal base	Zona mixta
Recorrido del fluido sobre la capa de metalizado	Presión constante de 696609 [Pa]	Presión constante de 696609 [Pa] con un pico de presión localizado de 706833 [Pa]
Desgaste superficial / cambio de espesor entre el metalizado y el metal base	Descenso de presión en un intervalo de 693479 [Pa] a 684088 [Pa]	Descenso de presión en un intervalo de 698696 [Pa] a 692435 [Pa]
Recorrido sobre la curvatura del borde de la probeta	Aumento de la presión hasta 698696 [Pa]	Aumento de la presión hasta 697652 [Pa]
Trayecto libre del fluido tras abandonar la probeta	Se presenta un pico localizado de presión de 704917 [Pa] y después se mantiene constante con un valor de 702869 [Pa]	La presión se mantiene constante con un valor de 701826 [Pa]

Fuente: Autores

Realizado por: Autores



**Figura 3-47:** Perfil de velocidad del fluido. a) Metal base. b) Zona de convergencia metal base con la capa de metalizado.

Realizado por: Autores

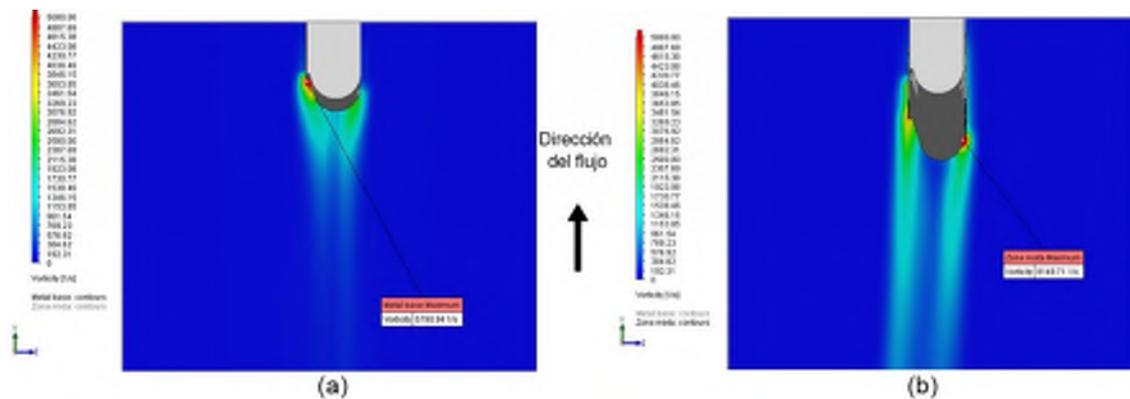
**Tabla 3-14:** Análisis de la variación de la velocidad en la probeta con desgaste superficial ubicada en la salida del rodete.

Zona de análisis	Zona de interacción	
	Metal base	Zona mixta
Recorrido del fluido sobre la capa de metalizado	Velocidad constante de 8,6 m/s	Velocidad constante de 8,6 m/s
Desgaste superficial / cambio de espesor entre el metalizado y el metal base	Descenso de la velocidad en un intervalo de 7,2 m/s a 3,5 m/s	Descenso de la velocidad en un intervalo de 7,5 m/s a 3,1 m/s
Recorrido sobre la curvatura del borde de la probeta	Velocidad constante de 3,5 m/s	Velocidad variable en un intervalo de 3 m/s a 1 m/s
Trayecto libre del fluido tras abandonar la probeta	Aumento progresivo de la velocidad del fluido en un intervalo de 4,8 m/s a 7,9 m/s	Aumento progresivo de la velocidad del fluido en un intervalo de 3 m/s a 7 m/s

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

La Figura 3-47 y Tabla 3-14, permiten observar que el fluido tiende a reducir su velocidad cuando se encuentra con un cambio de sección en su recorrido además de generar un descenso brusco de velocidad cuando abandona la superficie de la probeta generando una especie de estela con los valores más bajos de velocidad en su interior y aumentándolos progresivamente a medida que se aleja de la probeta.



**Figura 3-48:** Perfil de vorticidad del fluido. a) Metal base. b) Zona de convergencia metal base con la capa de metalizado.

Realizado por: Autores

**Tabla 3-15:** Análisis de la variación de la vorticidad en la probeta con desgaste superficial ubicada en la salida del rodete.

Zona de análisis	Zona de interacción	
	Metal base	Zona mixta
Recorrido del fluido sobre la capa de metalizado	No se registra actividad	Ligera actividad sobre su lado de presión con valores aproximados 1379 Hz
Desgaste superficial / cambio de espesor entre el metalizado y el metal base	Pico de vorticidad con un valor de 5790 Hz en su lado de succión.	Picos de vorticidad puntuales con un valor de 8148 Hz en su lado de succión y 4137 Hz en su lado de presión.
Recorrido sobre la curvatura del borde de la probeta	Descenso de la vorticidad en un intervalo de 3965 Hz a 1379 Hz	Descenso de la vorticidad en un intervalo de 3103 Hz a 689 Hz
Trayecto libre del fluido tras abandonar la probeta	Descenso progresivo de la vorticidad hasta alcanzar valores bajos de 862 Hz	Descenso progresivo de la vorticidad hasta alcanzar valores bajos de 344 Hz

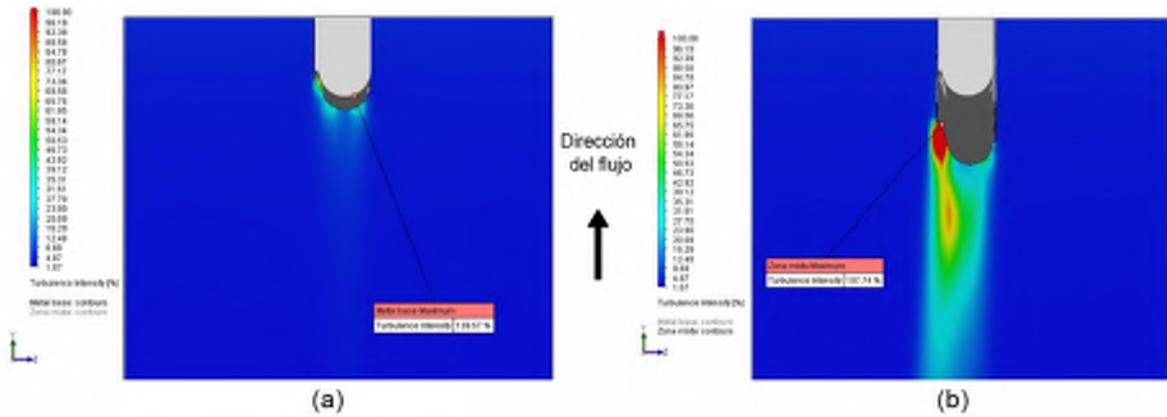
Fuente: Autores

Realizado por: Autores

La Figura 3-48, muestra los puntos que son más propensos a generar vorticidad en el fluido. En el caso de la zona del metal base se observa un pico de vorticidad máxima de 5790 Hz en la zona que presenta erosión superficial. A medida que el fluido se aleja de la probeta estos valores van descendiendo hasta que la vorticidad se vuelve casi nula.

En el caso de la zona mixta de capa de metalizado y metal base, se puede observar que la vorticidad se produce en las regiones en las que hay cambios consecutivos de espesor debido al desgaste erosivo de la capa de metalizado y el metal base tal como se detalla en la Tabla 3-15.

La presencia de una alta vorticidad en la zona del borde de salida de la probeta constituye un riesgo para los elementos mecánicos cercanos como lo es el cono del rodete, mismo que sufre desgaste debido a la alta vorticidad generada en su zona baja.



**Figura 3-49:** Perfil de intensidad de turbulencia del fluido. a) Metal base. b) Zona de convergencia metal base con la capa de metalizado.

**Realizado por:** Autores

**Tabla 3-16:** Análisis de la variación de la intensidad de turbulencia en la probeta con desgaste superficial ubicado en la salida del rodete.

Zona de análisis	Zona de interacción	
	Metal base	Zona mixta
Recorrido del fluido sobre la capa de metalizado	No se registra actividad	No se registra actividad
Desgaste superficial / Cambio de espesor entre el metalizado y el metal base	Pico de turbulencia en su lado de succión con un valor de 139%	Pico de turbulencia en su lado de succión con un valor de 197%
Recorrido sobre la curvatura del borde de la probeta	Descenso de la turbulencia en un intervalo de 38% a 29%	Valores constantes de turbulencia en su lado de succión con 197%
Trayecto libre del fluido tras abandonar la probeta	Descenso progresivo de la turbulencia hasta alcanzar valores de 2%	Descenso progresivo de la turbulencia hasta alcanzar valores de 11%

**Fuente:** Autores

**Realizado por:** Autores

La Figura 3-49, muestra el desarrollo de la intensidad de turbulencia cuando el fluido atraviesa la superficie de la probeta. En la zona del metal base la intensidad de turbulencia crece cuando el fluido se encuentra con cavidades formadas por la erosión del material, mientras en la zona de mixta se visualiza un incremento de la turbulencia cuando el fluido se encuentra con cambios de sección repentinos de la capa de metalizado y metal base producto del desgaste superficial.

Analizando los dos escenarios la turbulencia en la Tabla 3-16 se observa que esta vuelve más intensa al combinar contactos múltiples y continuos entre metal base y capa de metalizado generando incluso estelas que envuelven a la superficie cercana de la probeta.

### 3.7. Puntos críticos detectados en la probeta en diferentes escenarios

#### 3.7.1. Zona de ingreso al rodete

**Tabla 3-17:** Puntos críticos máximos detectados en la probeta sin desgaste superficial.

Zona	Ingreso al rodete		
Probeta sin desgaste en la capa de metalizado			
	Espesor		
Propiedad	115 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	350 $\mu\text{m}$
Densidad	Constante	Constante	Constante
Temperatura	Constante	Constante	Constante
Velocidad	●		
Presión	●		
Vorticidad	●		
Turbulencia		●	

Fuente: autores

Realizado por: Autores

La Tabla 3-17, indica que los picos máximos en la probeta sin desgaste en el ingreso al rodete se generan en el punto de espesor 115  $\mu\text{m}$ . Si bien la tendencia indica que los picos se producen en los puntos de mayor espesor este fenómeno puede producirse debido a la propia geometría y morfología de la capa de metalizado.

Sin embargo, analizando las tablas de resultados se observa que el punto con espesor de 520  $\mu\text{m}$  presenta picos más altos en los valores de las propiedades del fluido que el punto con 250  $\mu\text{m}$  lo que confirma que independientemente de la morfología de la capa de metalizado un mayor espesor concentra esfuerzos en su superficie.

La Tabla 3-18, que se presenta a continuación indica que en la zona de interacción del fluido con el metal base la velocidad y vorticidad tienen sus picos más altos en el lado de presión mientras una mayor turbulencia se generó en el lado de succión.

La presión alcanza valores altos en los lados de presión y succión. En la zona mixta los picos más altos de velocidad, presión, vorticidad y turbulencia se alcanzan en el lado de presión.

**Tabla 3-18:** Puntos críticos detectados en la probeta con desgaste superficial.

Zona	Ingreso al rodete			
Probeta con desgaste superficial				
	Metal base		Zona mixta	
Propiedad	Lado de presión	Lado de succión	Lado de presión	Lado de succión
Densidad	Constante	Constante	Constante	Constante
Temperatura	Constante	Constante	Constante	Constante
Velocidad	•		•	
Presión	•	•	•	•
Vorticidad	•		•	
Turbulencia		•	•	

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

### 3.7.2. Zona de descarga del rodete

**Tabla 3-19:** Puntos críticos en la probeta sin desgaste superficial a la salida del rodete

Zona	Salida del rodete		
Probeta sin desgaste en la capa de metalizado			
	Espesor		
Propiedad	115 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	520 $\mu\text{m}$
Densidad	Constante	Constante	Constante
Temperatura	Constante	Constante	Constante
Velocidad			•
Presión			•
Vorticidad	•		
Turbulencia			•

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

La Tabla 3-19, indica que los picos máximos en la probeta sin desgaste en la salida del rodete se generan en el punto de espesor 520  $\mu\text{m}$ .

Si bien la tendencia indica que los picos se producen en los puntos de mayor espesor este fenómeno puede producirse debido a la propia geometría y morfología de la capa de metalizado, la cual se encuentra con múltiples cambios de sección que ayudan a ese comportamiento del fluido cuando interactúa con estas zonas.

**Tabla 3-20:** Puntos críticos en la probeta con desgaste superficial a la salida del rodete

Zona	Salida del rodete			
Probeta con desgaste superficial				
	Metal base		Zona mixta	
Propiedad	Lado de presión	Lado de succión	Lado de presión	Lado de succión
Densidad	Constante	Constante	Constante	Constante
Temperatura	Constante	Constante	Constante	Constante
Velocidad	•		•	
Presión	•	•	•	
Vorticidad		•	•	
Turbulencia	•			•

Fuente: Autores

Realizado por: Autores

La Tabla 3-20, indica que en la zona de interacción del fluido con el metal base la velocidad e intensidad de turbulencia tienen sus picos más altos en el lado de presión mientras una mayor vorticidad se generó en el lado de succión.

La presión alcanza valores altos en los lados de presión y succión. En la zona mixta los picos más altos de velocidad, presión, vorticidad se alcanzan en el lado de presión, mientras que la turbulencia alcanza su pico en el lado de succión de la probeta.

## CONCLUSIONES

Al realizar la selección de los álabes para la extracción de la probeta, mediante inspección visual se pudo observar que el desgaste superficial en la capa de metalizado como en el metal base era más agresivo en el lado de presión de los álabes del rodete, especialmente en el borde de salida, esto como resultado de la implosión de las burbujas producto de la cavitación. Si bien el lado de succión presentaba desgaste sobre la capa de metalizado este no resultaba tan grave.

El SEM permitió identificar a detalle el contorno del perfil de anclaje y borde de la capa de metalizado de la probeta, así como las múltiples cavidades consecuencia del desprendimiento de material debido a la cavitación.

El modelado y ensamble de los elementos hidráulicos tanto de la turbina como la probeta se los realizó utilizando el software Solidworks utilizando información obtenida por investigación, así como documentación facilitada por el CIRT, tal como planos y sólidos 3D escaneados mediante ingeniería inversa, realizando ligeras correcciones sobre algunos de estos elementos para realizar un adecuado proceso de simulación y análisis.

La probeta se modeló de tal manera que tenga la mayor cantidad de detalles de similitud con el modelo real extraído del álabe tanto en la zona del metal base como en las capas de metalizado del lado de presión y succión (véase Figura 3-4). Para lograr esto se utilizaron como guía los perfiles de anclaje y contorno de capa de metalizado obtenidos en el SEM.

Los valores obtenidos como resultados de la simulación de la turbina Francis concuerdan con los valores nominales establecidos, si bien existe un margen de diferencia, estos valores no son muy dispersos lo que permite establecer que los procesos de simulación se realizaron dentro de los parámetros normales de operación.

Los resultados de los diferentes escenarios de simulación permiten observar la formación de mini vórtices de burbujas en el borde de ataque de la probeta (véase Figura 3-15), además de cambios repentinos y bruscos de presión, velocidad, vorticidad y turbulencia, mismas que resultan condiciones idóneas para la formación del fenómeno de cavitación. Así mismo se puede evidenciar una alta vorticidad y la formación de torbellinos en la zona baja del cono del rodete (véase Figura 3-14 y Figura 3-12)

Las simulaciones CFD realizadas en cada uno de los escenarios se llevaron a cabo mediante el paquete Flow Simulation de SolidWorks. Debido a la emergencia establecida en el país y la imposibilidad de seguir utilizando la infraestructura tecnológica del CIRT la finalización de este proyecto de investigación se llevó a cabo con recursos propios (véase Tabla 2-1) mismos que

permitieron obtener resultados satisfactorios con un nivel de mallado en la medida de las limitaciones de hardware del equipo.

Según los resultados obtenidos de todos los escenarios de simulación, la variación en los valores de densidad y la temperatura son mínimos por lo que pueden considerarse despreciables y asumir que estas propiedades permanecen constantes a lo largo del trayecto del fluido sobre la probeta.

En el escenario de simulación en el que no se presenta desgaste en la capa de metalizado, la Figura 3-27 y Figura 3-28, nos permiten observar cómo se comporta el fluido cuando encuentra en su trayectoria con cambios de sección. La velocidad tiende a descender de forma abrupta, mientras que la presión se incrementa y hay un aumento en la generación de vórtices que se distribuyen a lo largo de las zonas cercanas a la capa de metalizado.

La Figura 3-34, revela las zonas que por su geometría son más propensas a generar vorticidad. En el caso del análisis en la zona de metal base, se observa que una alta vorticidad es generada cuando el fluido encuentra en su camino grandes cambios de sección. Mientras en el caso de la zona de convergencia entre el metal base y la capa de metalizado, se puede observar que la mayor variación de vorticidad se produce cuando el fluido se encuentra con la geometría propia del metalizado.

Según el análisis realizado e indicado en las tablas finales del CAPITULO III, los mayores efectos producto de los fenómenos hidráulicos los soporta el lado de presión de la probeta debido a su geometría y la misma naturaleza del fluido. Además, se evidencia que al ingreso del rodete si el álabe tiene un espesor de la capa de metalizado menor al nominal ( $250\ \mu\text{m}$ ) se producen picos en los valores de velocidad, presión y vorticidad.

Un espesor uniforme de  $250\ \mu\text{m}$  en la capa de metalizado de carburo de tungsteno no produce grandes alteraciones en las propiedades del fluido como ocurre con capas de menor o mayor espesor.

## **RECOMENDACIONES**

Continuar con este trabajo de investigación, mejorando los escenarios de simulación con recursos computacionales de mayor capacidad que permitan refinar las mallas para obtener resultados más precisos.

Tomar como base la información adquirida en esta investigación e incluir la presencia de partículas en suspensión en el fluido, mismas que son influyentes en el desgaste de los elementos hidráulicos. Esto, apoyándose en el análisis químico y mineralógico de sedimentos realizado en las centrales hidroeléctricas Agoyán y San Francisco, puesto que este análisis revela alta presencia de partículas de hierro, silicio, aluminio y magnesio que por sus propiedades mecánicas resultan perjudiciales para los álabes de rodete.

Se propone realizar estudios de esta investigación utilizando el software *ANSYS*, mismo que ayudaría a generar mejoras sobre el modelo 3D de la probeta, y con ello manejar de mejor manera cada escenario de simulación comparando los resultados obtenidos.

## GLOSARIO

**Adhesión:** Fuerzas intermoleculares que permiten que dos superficies o sustancias permanezcan unidas (Cardona, 2017).

**Cavitación:** Efecto de cavitación producida por la rotación de una hélice sumergida en un fluido, por el cual a la formación de burbujas de vapor que tiene lugar sucede la rápida implosión de las mismas, provocando en la superficie de la hélice un efecto de corrosión por picadura (RAI, 2020).

**Cono:** Extensión del cubo o núcleo del rodete, que guía el agua cuando abandona el rodete de un aprovechamiento hidroeléctrico (RAI, 2020).

**CFD:** Dinámica de fluidos computacional es el área del conocimiento que involucra la simulación numérica de flujo de fluidos, la transferencia de calor entre otros fenómenos físicos (Mirlisenna, 2016).

**CIRT:** El Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales es un centro encargado de aportar de manera técnica, tecnológica e investigativa al proceso de recuperación de piezas y partes hidráulicas de las centrales de generación eléctrica del país (CELEC EP, 2019).

**Embalse:** Construcción hecha por el hombre parcial o totalmente destinada para el almacenamiento o regulación, y control del agua (RAI, 2020).

**Erosión:** Ataque de la superficie de un material, producido por el fenómeno de cavitación, efecto hidrodinámico producido cuando un fluido pasa a gran velocidad por un conducto (RAI, 2020).

**Metalizado:** Recubrimiento utilizado para proteger la superficie del rodete de la turbina ante los efectos de la cavitación y erosión, alargando la vida útil de este elemento mecánico (Balseca & Telenchana, 2019).

**Probeta:** En mecánica, muestra normalizada que se utiliza en distintos ensayos mecánicos y que tiene una forma predeterminada (RAI, 2020).

**Simulación:** Proceso que utiliza sistemas informáticos para comprobar de manera experimental cómo funcionaría un determinado sistema recreando escenarios reales e hipotéticos (Mirlisenna, 2016).

## BIBLIOGRAFÍA

**AGRONOMS.** *Enginyers Agrònoms de Catalunya*. [blog]. [Consulta 13 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://www.agronoms.cat/>

**ANDRITZ HYDRO AG, HYDRONEWS.** [blog]. [Consulta: 15 de diciembre de 2019]. Disponible en: [www.andritz.com](http://www.andritz.com)

**ASTM A743,** *Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application.*

**ASTM E3-11,** *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens.*

**BALLESTEROS TAJADURA, Rafael.** Modelización del flujo en ventiladores axiales de paso variable. (Trabajo de titulación) (Doctorado). Universidad de Oviedo – Gijón. 1992. pp. 18 – 19 [Consulta: 16 de abril de 2020]. Disponible en: <https://tdx.cat/handle/10803/11111>

**BALSECA, Yidemny & TELENCHANA, Alexis.** Procedimiento de reparación e inspección del rodete francis de la central hidroeléctrica san francisco mediante sustitución de material de los álabes por insertos metálicos prefabricados. (Trabajo de titulación) (Ingeniería), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2019. [Consulta 23 noviembre de 2019]. Disponible en <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/11530>

**CABALLERO, José Luis., APERADOR, Willian, & DELGADO, Amoldo.** “Determinación del desgaste por erosión en Materiales Recubiertos” Información Tecnológica [en línea] 2015, España [Consulta: 7 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v26n2/art19> pp. 164-165

**CAÑIZARES, Christian Fabián, & QUINCHUELA, Juan Carlos.** Tecnologías para la recuperación por soldadura de álabes de turbinas hidráulicas construidas de acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM (UNS J91540). (Trabajo de titulación) (Ingeniería), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2017. [Consulta: 29 de noviembre de 2019]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6977>

**CARBONES Y SISTEMAS.** *CarboSystem*. [blog]. [Consulta: 20 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://carbosystem.com/>

**CARDONA, Rubén.** *Infocorrosion*. [blog]. [Consulta: 17 junio de 2020]. Disponible en: <https://www.infocorrosion.com/index.php/revista-digital>

**CELEC EP.** *CELEC EP Hidroagoyán*. [blog]. [Consulta: 15 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/>

**GÓMEZ GONZÁLEZ, Samuel.** Mallado y simulación CFD de automóvil. (Trabajo de titulación) (Masterado) Escola Tecnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Barcelona, 2017. [Consulta 23 de enero de 2020]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/108947>

**GUEVARA CHÁVEZ, Carlos** “Comportamiento Tribológico y Microestructural en Recubrimientos Aplicados por GTAW y HVOF (Proceso Térmico Esperado) y Usado en Recuperación de Aceros Grado Herramienta AISI/SAE D2. [en línea]. *Soldagem & Inspeção* 2016. [Consulta: 7 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://www.scielo.br/pdf/si/v21n2/0104-9224-si-21-2-228>

**HANDBOOK, A.** *Thermal Spray Technology* (Vol. 9).

**LAZO VÁSQUEZ, David Alejandro.** Análisis del ciclo de vida y energético de las centrales hidroeléctricas Agoyan y Paute. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2015. [Consulta 26 de noviembre de 2019] Disponible en: [bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10531/1/CD-6231](http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10531/1/CD-6231)

**LÓPEZ, Verónica, & RAMÍREZ, Wilson.** Diseño de un horno para tratamiento térmico del rodete de la turbina francis (CELEC Unidad de Negocio Hidroagoyán). (Trabajo de titulación) (Ingeniería), ESPOCH, Facultad de Mecánica, Riobamba. [Consulta 7 de enero de 2020] Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/1398>

**MACAS DÍAZ, Jorge Ricardo.** Estudio y Simulación Numérica de la Cavitación Inducida por los Álabes Directores de una Turbina Francis con Características Similares a la de la Central Hidroeléctrica San Francisco. (Trabajo de titulación) (Ingeniería), Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. [Consulta 7 de enero de 2020]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18840>

**MIRLIENNA, Giuseppe.** *Método de los elementos finitos*. [blog]. [Consulta 21 de marzo de 2020] Disponible en: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>

**MORA SÁNCHEZ, Christian Andrés.** Análisis de la eficiencia de una turbina tipo francis con características similares a la de la central hidroeléctrica San Francisco (Trabajo de titulación) (Masterado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2018. [Consulta 15 de febrero de 2020] Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19561>

**PUNSET FUSTE, Miquel.** Desarrollo y optimización de recubrimientos hvof base wc-cocr para aplicaciones aeronáuticas. (Trabajo de titulación) (Doctorado) Universidad Politécnica de

Catalunya, Departamento de Ciencias Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Barcelona, España.  
Disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/586165>

**RAI.** *Real Acadèmia de Ingenieria* [blog]. [Consulta: 22 de 12 de 2020]. Disponible en:  
<http://www.raing.es/es>

**RUIZ DIAZ, Adriana, & LÓPEZ, Alfredo.** *Mallado para simulaciones*. [blog]. [Consulta: 13 de mayo 2020]. Disponible en: <http://www.ing.una.py/?p=25043>

**SALAZAR FREIRE, Mayra Isamar, & NÚÑEZ NÚÑEZ, Diego Fernando.** Diseño de la estación y selección de equipamiento para la cabina de metalizado de turbinas hidráulicas de CELEC EP - HIDROAGOYAN. (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. [Consulta: 16 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/26784>

**SANCHO SORIA, Ana Paula.** *Análisis químico y mineralógico de sedimentos Centrales Hidroeléctricas Agoyán y San Francisco - CELEC EP. CIRT- Control de Calidad y Laboratorio*, Baños de Agua Santa, Ecuador. 2019

**SSPC-SP COM.** *Surface Preparation Commentary for Steel and Concrete Substrates*.

**TOAPANTA DEFAZ, Marcelo.** “Plan de control y aseguramiento de la calidad para la recuperación de un rodete de turbina Francis de una central hidroeléctrica”. CENACE – Revista Técnica energía, n° 2 (2019) (Ecuador).

**TORRES JARAMILLO, Santiago.** Diseño y construcción de un prototipo de una estación de limpieza mecánica mediante el proceso de sandblasting utilizando granalla mineral en ciclo continuo para una unidad de mantenimiento y transporte. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad de las Fuerzas Armadas, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Sangolquí, Ecuador. [Consulta: 25 de febrero de 2020] Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/7440>

**UPV.** *Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo*. [blog]. [Consulta: 12 abril 2020] Disponible en: <http://www.upv.es/entidades/SME/info/859071normalc.html>

**URVINA PÉREZ, Carlos Miguel.** Estudio y simulación numérica de los efectos de flujo cavitativo en turbinas tipo francis de la central hidroeléctrica "AGOYAN". (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Pichincha, Ecuador. [Consulta: 9 de abril de 2020] Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/15355/1/CD-7051>

**ZEGARRA VELASQUEZ, Roberto Luis.** Análisis y simulación fluidodinámica del fenómeno de cavitación en una turbina Francis. (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad Nacional

Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Lima. [Consulta: 4 de Junio de 2020].  
Disponibile en: <https://core.ac.uk/download/pdf/323341428>.

**ZEISS.** *ZEISS EVO Scanning Electron Microscope.* [blog]. [Consulta: 9 abril 2020] [Consulta: 6 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.zeiss.com/microscopy/us/products/scanning-electron-microscopes/evo.html>

