



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA OBTENCIÓN DE LA EFICIENCIA EN  
TURBINAS HIDRÁULICAS MEDIANTE EL MÉTODO TERMODINÁMICO**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**I.M.I. JOSEPH MARTÍNEZ ALCÁNTARA**

**DIRECTOR(ES): DRA. LAURA LILIA CASTRO GÓMEZ  
DR. GUSTAVO URQUIZA BELTRAN**

**NOMBRE DE LOS SINODALES:  
DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO**

**CUERNAVACA, MORELOS**

**JUNIO 2018**

## RESUMEN

Conocer el rendimiento en una central hidroeléctrica permite una mejor explotación de esta mediante la optimización del aprovechamiento del agua disponible, así mismo permite realizar un seguimiento del estado de la unidad, cuyo deterioro se ve reflejado directamente en la pérdida de rendimiento de la instalación. Existen varios métodos normalizados que nos permiten realizar el cálculo del rendimiento a través de la medición del caudal, sin embargo, su aplicación no siempre es factible por lo tanto es necesario usar un método alternativo que permita el cálculo del rendimiento sin la necesidad de medir el caudal: el método termodinámico.

El presente trabajo se centra en el diseño de un sistema que permita la determinación del rendimiento en una turbina hidráulica y a partir de dicho cálculo obtener el caudal utilizado. El diseño cumple los lineamientos de la norma IEC 60041:1991, además se espera que la aplicación del sistema de toma de muestras pueda ser utilizado para la obtención del rendimiento en centrales con caídas menores que los especificados en la norma. Se explica la teoría del método, el diseño del dispositivo de toma de muestras para la sección de alta presión, así como las consideraciones tomadas para su diseño. Se explica el montaje de dispositivos a emplear para la medida de las variables en la sección de baja presión (tubo de aspiración).

Se realizó una simulación de flujo en el recipiente de medida para verificar que existe concordancia entre los cálculos de las variables consideradas para su diseño y el comportamiento del flujo de al interior de este. Además, fue necesario efectuar una simulación adicional que permitiera el análisis de la temperatura, presión y velocidad en el tubo de aspiración, específicamente en el área donde se estableció la sección de medida para el lado de baja presión.

## **ABSTRACT**

Knowing the performance in a hydroelectric power station allows a better exploitation of this by optimizing the use of available water, likewise, it allows us to track the state of the unit, whose deterioration is directly reflected in the loss of performance of the installation. There are several standardized methods that allow us to perform the calculation of performance through the measurement of the flow, however, its application is not always feasible, so it is necessary to use an alternative method that allows the calculation of performance without the need to measure the flow: the thermodynamic method.

The present work focuses on the design of a system that allows the determination of the performance of a hydraulic turbine and from this calculation to obtain the flow used. The design complies with the guidelines of IEC 60041: 1991, it is also expected that the application of the sampling system can be used to obtain the performance in plants with leaps less than those specified in the standard. It explains the theory of the method, the design of the sampling device for the high-pressure section, as well as the considerations taken for its design. The assembly of devices to be used for the measurement of the variables in the low-pressure section (draft tube) is explained.

A flow simulation was performed in the measuring vessel to verify that there is agreement between the calculations of the variables considered for its design and the behaviour of the flow inside it. In addition, it was necessary to carry out an additional simulation that allowed the analysis of the temperature, pressure and velocity in the suction pipe, specifically in the area where the measurement section for the low-pressure side was established.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dra. Laura Lilia Castro Gómez por toda la confianza brindada y sobre todo por la oportunidad que me otorgó de realizar este trabajo de investigación bajo su guía; por sus consejos, pláticas y recomendaciones simplemente gracias, fue y será un honor haber trabajado a su lado.

Al Dr. Gustavo Urquiza Beltrán por invaluable apoyo durante la realización del presente trabajo de tesis.

Al Ing. Arturo Esteban Nava Torres, por su apoyo desinteresado durante toda la etapa que duró la realización de este proyecto de investigación.

Al personal académico del CIICAp por haberme compartido sus conocimientos sin ellos, la realización de una parte de esta tesis simplemente no hubiera sido posible.

A todo el personal administrativo de este excelente centro de estudios llamado CIICAp, por haberme facilitado en todo momento los trámites durante mi estancia como estudiante.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de posgrado.

## **DEDICATORIAS**

El presente trabajo está dedicado a mis padres: Nemesio Martínez Lagunas y Florencia Alcántara Arizmendi, quienes me han apoyado incondicionalmente en todo, es gracias a ellos quienes con muchos sacrificios hoy soy un profesionalista, me educaron con el ejemplo, enseñándome valores, me enseñaron a ser tenaz, a no darme por vencido y dar lo mejor de mí.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
SIMBOLOGÍA .....	xii
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES .....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.2 HIPÓTESIS.....	1
1.3 OBJETIVO GENERAL .....	2
1.3.1 Objetivos específicos.....	2
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.5 ALCANCE .....	3
1.6 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	3
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO .....	9
2.1 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS .....	9
2.1.1 Concesión del agua en México .....	10
2.3 MÉTODO TERMODINÁMICO PARA MEDICIÓN DE RENDIMIENTO	11
2.3.1 Principio del método .....	12
2.3.2 Aspectos excluidos y restricciones .....	13
2.3.3 Instrumentación.....	14
2.3.4 Rendimiento y energía mecánica específica .....	14
2.3.5 Método de medida de la energía mecánica específica.....	17
2.5 DISEÑO DE INGENIERÍA .....	24
2.5.1 Fases del proceso de diseño de ingeniería .....	24
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA .....	26
3.1 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN .....	26
3.1.1 Elección del método de medición de la energía mecánica específica .....	27
3.1.2 Definición de las secciones de medida.....	27
3.2 SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN .....	30

3.2.1	Medición de la temperatura .....	30
3.2.2	Medición de la presión.....	32
3.2.3	Mediciones auxiliares .....	33
3.3	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	35
3.3.1	Descripción del dispositivo usb-6343 .....	35
3.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE TOMAS DE MUESTRAS .....	36
3.4.1	Sonda de extracción.....	36
3.4.2	Recipiente de muestreo.....	38
3.4.3	Montaje del dispositivo de muestreo para la sección de alta presión. .....	41
3.4.4	Marco de muestreo para sección de baja presión .....	43
3.5	SIMULACIÓN DE FLUJO EN EL RECIPIENTE DE MUESTREO .....	44
3.5.1	Preprocesamiento .....	44
3.5.2	Procesamiento .....	47
3.6	SIMULACIÓN DE FLUJO EN LA TURBINA .....	47
3.6.1	Preprocesamiento .....	48
3.6.2	Procesamiento .....	50
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		51
4.1	RESULTADOS EN EL RECIPIENTE DE MUESTREO .....	51
4.1.1	Líneas de corriente.....	51
4.1.2	Contorno de presión.....	52
4.1.3	Contorno de velocidad.....	54
4.1.4	Contorno de temperatura .....	54
4.2	RESULTADOS EN LA TURBINA .....	55
4.2.1	Líneas de corriente.....	55
4.2.2	Contorno de velocidad.....	56
4.2.3	Contorno de temperatura .....	57
4.2.4	Contorno de presión .....	58
4.2.5	Análisis de la temperatura, presión y velocidad en la sección de medida en el tubo de aspiración.....	59

4.3 CÁLCULO DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA ESPECÍFICA DE LA TURBINA Y LA ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA EN EL RODETE ....	60
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	63
REFERENCIAS .....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Localización de los recipientes de medida.....	19
Figura 2.2 Representación esquemática de las secciones de referencia y medida. ....	22
Figura 2.3 Modelo descriptivo de 5 etapas del proceso de diseño. ....	24
Figura 3.1 Esquema de los puntos de medición en la tubería de presión.....	28
Figura 3.2 Localización de los puntos de muestreo en la tubería de presión. ....	28
Figura 3.3 Sección de medida en el lado de baja presión.....	29
Figura 3.4 Sonda Pt-100 SE012. ....	31
Figura 3.5 Transductor de presión T PMC 31. ....	32
Figura 3.6 Caudalímetro SBT634. ....	34
Figura 3.7 Dispositivo DAQ USB-6343. ....	35
Figura 3.8 Sonda de muestreo diseñada. ....	37
Figura 3.9 Dimensiones de la sonda de muestreo.....	38
Figura 3.10 Recipiente de muestreo diseñado.....	41
Figura 3.11 Dimensiones del recipiente de muestreo. ....	41
Figura 3.12 Dispositivo de muestreo para la sección de referencia del lado de alta presión. ....	42
Figura 3.13 Dispositivo de muestreo montado en la tubería de presión. ....	42
Figura 3.14 Distribución de instrumentos en la sección de baja presión. ....	43
Figura 3.15 Interior del recipiente de muestreo.....	44
Figura 3.16 Mallado del interior del recipiente. ....	45
Figura 3.17 Mallado del acoplado rodete/tubo de aspiración.....	48
Figura 4.1 Líneas de corriente al interior del recipiente de medida.....	51
Figura 4.2 Presión absolutas en las paredes del recipiente.....	52
Figura 4.3 Valores de presión absoluta a salida de la toma del instrumento. ....	53
Figura 4.4 Velocidad al interior del recipiente. ....	54
Figura 4.5 Temperatura al interior del recipiente. ....	55

Figura 4.6 Líneas de corriente en el tubo de aspiración. .... 56

Figura 4.7 Velocidad del flujo en la sección de medida de baja presión. .... 57

Figura 4.8 Temperatura en la sección de medida de baja presión. .... 58

Figura 4.9 Presión en la sección de baja presión. .... 59

Figura 4.10 Puntos de muestreo en la sección de medida de baja presión. . 59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Agrupación de los usos del agua. ....	10
Tabla 2.2 Volúmenes declarados para el pago de derechos por la producción de energía.....	11
Tabla 3.1 Condiciones de operación de la turbina. ....	26
Tabla 3.2 Características de la sonda Pt-100 SE012. ....	31
Tabla 3.3 Características del transductor de presión T PMC31.....	33
Tabla 3.4 Características del caudalímetro SBT634.....	34
Tabla 3.5 Información de la tubería de presión en la sección 11. ....	38
Tabla 3.6 Configuración de la simulación para el recipiente de muestreo. ...	46
Tabla 3.7 Configuración de simulación del acoplado rodete/tubo de aspiración.....	49
Tabla 4.1 Valores de presión, velocidad y temperatura en los puntos de muestreo. ....	60

## SIMBOLOGÍA

Símbolo	Descripción	Unidades
$\bar{a}$	Factor isotérmico	$m^3/kg$
$A_e$	Área a la entrada del recipiente	$m^2$
$A_s$	Área a la salida del recipiente	$m^2$
$A_i$	Área de la pared interna del recipiente	$m^2$
$\bar{c}_p$	Calor específico	$J/kg \cdot K$
$\delta E_m$	Término correctivo de la energía mecánica específica en el rodete	$J/kg$
$\Delta P_h$	Corrección de la potencia hidráulica	$W$
$E_m$	Energía mecánica específica en el rodete	$J/kg$
$E$	Energía hidráulica específica de la turbina	$J/kg$
$g$	Gravedad local	$m/s$
$\bar{g}$	Promedio del valor de la aceleración de la gravedad en las secciones de referencia de alta y baja presión	$m/s$
$H$	Caída neta de la turbina	$m$
$P_m$	Potencia mecánica del rodete	$W$
$P_h$	Potencia hidráulica	$W$
$P$	Potencia mecánica de la turbina	$W$
$P_{Lm}$	Pérdidas de la potencia mecánica	$W$
$P_f$	Potencia eléctrica suministrada a los equipos auxiliares de la turbina	$W$
$p_{abs1}$	Presión estática absoluta en la sección de referencia de alta presión	$Pa$
$p_{abs2}$	Presión estática absoluta en la sección de referencia de baja presión	$Pa$
$\rho$	Densidad del fluido	$kg/m^3$

$\bar{\rho}$	Promedio de las densidades de las secciones de referencia de alta y baja presión	$kg/m^3$
$Q$	Caudal volumétrico	$m^3/s$
$Q_e$	Caudal volumétrico a la entrada del recipiente	$kg/m^3$
$Q_s$	Caudal volumétrico a la salida del recipiente	$kg/m^3$
$q$	Presión dinámica	$Pa$
$v$	Velocidad del fluido	$m/s$
$v_e$	Velocidad del agua a la entrada del recipiente	$m/s$
$v_s$	Velocidad del agua a la salida del recipiente	$m/s$
$v_1$	Velocidad medida en la sección de referencia de alta presión	$m/s$
$v_2$	Velocidad medida en la sección de referencia de baja presión	$m/s$
$\vartheta$	Temperatura en Celsius	$^{\circ}C$
$\theta$	Temperatura termodinámica en Kelvin	$K$
$\eta$	Rendimiento de la turbina	Adimensional
$\eta_h$	Rendimiento hidráulico	Adimensional
$\eta_m$	Rendimiento mecánico	Adimensional
$z_1$	Nivel en la sección de referencia de alta presión	$m$
$z_2$	Nivel en la sección de referencia de baja presión	$m$

## **CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en su artículo 27, establece que los recursos hídricos del país son un bien nacional, y el uso y aprovechamiento de las aguas superficiales se realizará mediante concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), siendo esta la que fija un monto a cobrar por dicho uso y aprovechamiento.

El volumen de agua concesionado a nivel nacional para el uso en hidroeléctricas asciende a los 178,622 millones de metros cúbicos en 2015 de acuerdo con cifras oficiales de la CONAGUA, mientras que en 2014 este volumen fue de 133,018 millones de metros cúbicos, permitiendo la generación de 37.5 *TWh* de energía eléctrica (14.9% del total nacional). También en 2014 la capacidad instalada en las centrales fue de 12, 269 *MW* correspondiente al 22.6% de la capacidad instalada en el país.

Es por eso por lo que es relevante la medición del caudal utilizado en las centrales hidroeléctricas no sólo por el pago de la explotación del agua, también es de gran importancia su determinación en lo que respecta al cumplimiento de garantías de rendimiento de las turbinas hidráulicas.

### **1.2 HIPÓTESIS**

Cuando existen las condiciones favorables, es posible realizar mediciones precisas de la eficiencia a través del uso del método termodinámico en centrales hidroeléctricas con caídas menores a 100 metros, ya que la instrumentación, así como los sistemas de adquisición de datos cuentan con

mejoras que los hace más estables y precisos, reduciendo en gran medida la incertidumbre.

### **1.3 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un sistema para la obtención de la eficiencia en turbinas hidráulicas mediante el método termodinámico de acuerdo con la norma IEC 60041, el cual permita determinar el caudal utilizado a partir de la eficiencia de la máquina.

#### **1.3.1 Objetivos específicos**

- Determinar las condiciones de operación a las cuales el sistema propuesto podría aplicar.
- Sugerir la instrumentación a utilizar para la obtención de las variables de interés para la determinación de la eficiencia a través del método termodinámico.
- Sugerir un sistema de adquisición de datos.
- Diseñar los dispositivos de toma de muestras que se instalarán en la tubería de presión y en el tubo de aspiración.
- Analizar y evaluar del sistema propuesto.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN**

Es posible medir el rendimiento de una central hidroeléctrica a través del método termodinámico, ya que conocerlo permite un mejor aprovechamiento de la central, así como dar seguimiento a las condiciones de la unidad.

El método termodinámico para la medición de rendimiento permite deducir el caudal a partir de la energía específica y la potencia.

El caudal instalado es una de las magnitudes fundamentales cuando se planea el establecimiento de una central hidroeléctrica, ya que la potencia eléctrica producida por la central es directamente proporcional a la altura de la caída del agua y del caudal instalado.

## **1.5 ALCANCE**

El presente trabajo se centra en el diseño de un sistema que permita medir el caudal a través del método termodinámico respetando los lineamientos establecidos en la norma IEC 60041 “Pruebas de aceptación para determinar el rendimiento hidráulico de las turbinas hidráulicas, bombas de acumulación y turbinas bombas”.

Se incluirá la descripción de la instrumentación a realizar, la adquisición de los datos, así como el tratamiento y el análisis de estos. Así mismo se definirá en qué tipo de turbinas podrá utilizarse el sistema.

## **1.6 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Se llevó a cabo una revisión de trabajos publicados relacionados con la aplicación del método termodinámico para la medición de rendimiento en diferentes tipos de turbinas, siendo uno de los principales aspectos el conocer y comparar la instrumentación utilizada en cada caso.

Feng *et al.* (2008) realizaron pruebas de recepción en una unidad reversible de la central de TaiAn con el fin de verificar su comportamiento (modo turbina o modo bomba) con diferentes niveles de caída, usando dos recipientes de muestreo en la entrada y tres recipientes más en la salida con el fin de simplificar la distribución de temperatura/energía en el lado de alta presión y

baja presión. A pesar de esta simplificación se obtuvieron resultados confiables y precisos.

Hulaas *et al.* (2008) describen de acuerdo con su experiencia con turbinas Pelton algunas maneras de tomar muestras de agua para la medición de la distribución de la energía, así como para la medición de temperatura en la sección del canal de descarga ya sea a través de la utilización de un “haz de muestreo” horizontal o el uso de tubos perforados verticales.

Kah Raman *et al.* (2009) llevaron a cabo la evaluación de la eficiencia de energía de la planta de Keban (Turquía) de manera experimental y numérica usando el método termodinámico (método directo) obteniendo una buena concordancia entre los valores calculados y aquellos observados, demostrando que el método termodinámico para el cálculo de eficiencia es un método de fácil aplicación y efectivo en una planta hidroeléctrica.

Hulaas y Vinnog (2010) con base en la experiencia hacen algunas recomendaciones a la norma IEC 60041, ejemplo de ello es la consideración de la aplicación del método termodinámico para caídas menores a 100 m, sugiriendo que le limite podría ser de 80 m, pero mencionando que si de existir las condiciones favorables la implementación de este método podría ser para caídas aún más pequeñas.

Abgottspon *et al.* (2010) propone ciertas contribuciones para los términos correctivos (correcciones) en las medidas de la eficiencia del método termodinámico, concentrándose en el término correctivo para la energía mecánica específica, reduciendo considerablemente el porcentaje que aporta dicha corrección al total de la energía mecánica específica, el cual no debe exceder el 2%.

Patil *et al.* (2010) llevaron a cabo la medición de la eficiencia usando el método termodinámico, en un arreglo experimental dentro de un laboratorio con una turbina y una bomba, usando sensores de temperatura estables (RTD tipo Pt-100), transmisores de presión electrónicos y un sistema de adquisición de datos de alta precisión y alta resolución, obteniendo datos satisfactorios. A partir de estos resultados, consideran que la misma instrumentación (adaptada adecuadamente) puede ser usada para la medición de la eficiencia en una central.

Mangla y Khodre (2010) elaboraron un arreglo para la validación del método termodinámico, su banco de pruebas fue configurado para un modelo de prueba de una turbina Francis, también fue desarrollado un software que fue usado para la adquisición y tratamiento de los datos.

Rau y Eissner (2012) utilizaron el método termodinámico como referencia para compararlo con otros métodos de medición de caudal (pinza ultrasónica, ultrasonido estacionario y la medida de la carrera de las agujas) en una turbina Pelton con una caída aproximadamente de 500 *m*, obteniendo resultados que concuerdan muy bien con aquellos encontrados con el método termodinámico.

Côté y Proulx (2012) Realizaron mediciones de la eficiencia usando el método termodinámico en una planta al norte de Quebec (Canadá). Los resultados obtenidos se compararon con otros datos resultantes utilizando el método acústico, siendo la eficiencia medida con el primero 0.07% mayor que la eficiencia medida con el método acústico.

Lanzersdorfer y Götsch (2015) proponen diversas soluciones analíticas para la determinación del caudal usando el método termodinámico y la medición

de la potencia. Sin embargo, su método para la medición del flujo no está cubierto por ninguna norma internacional.

Sevcik (2016) hace la comparación de los resultados obtenidos de la medición de eficiencia en tres turbinas Pelton a través de método termodinámico contra la utilización de un flujómetro ultrasónico, en una central hidroeléctrica en Caoria, Italia. Se obtuvieron resultados casi idénticos con una potencia superior al 50% de la salida máxima de la unidad.

Alič y Dolenc (2016) realizaron la medición de la eficiencia con el método termodinámico después de la remodelación y elevación de una turbina Francis, midiendo la temperatura en la sección de baja presión dentro del canal de salida, demostrando que si se siguen los procedimientos de instalación y calibración de las sondas Pt-100 se pueden obtener mediciones de temperatura confiables.

Rakusch *et al.* (2016) trabajaron en un nuevo sistema de medición y adquisición de datos para pruebas de recepción en central usando el método termodinámico. Su sistema logró la reducción de la incertidumbre promedio de la eficiencia en una central con una caída de 100 m, esto al reducir la incertidumbre en las mediciones de temperatura junto con la utilización la formulación de las propiedades termodinámicas del agua provistas por la asociación internacional de las propiedades del agua y del vapor (IAPWS por sus siglas en inglés)

Es también importante observar los resultados producidos cuando se utiliza el método termodinámico para cálculo de rendimiento en centrales con caídas menores a 100 m.

Ramdal *et al.* (2010) llevaron a cabo mediciones de la eficiencia usando el método termodinámico en una planta con una caída de 46.5 m, concluyendo que para el uso de este método en una central con una caída menor al establecido por la norma IEC 60041 es importante tener condiciones estables de temperatura y control de la energía de salida, así como contar con una buena calibración de los instrumentos utilizados.

Muciaccia *et al.* (2010) describen en su trabajo algunas aplicaciones de un método experimental que combina el método termodinámico y el método calorimétrico para obtener la eficiencia total de una pequeña central hidroeléctrica.

Hulaas *et al.* (2012) presentaron una comparación de la medición de la eficiencia realizadas con el método termodinámico y el método de Gibson en la central hidroeléctrica de Gråsjø que cuenta con una caída de 52 m, los resultados de ambas mediciones concuerdan bastante bien.

Tantaworranart (2016) en su proyecto realizó por primera vez en Tailandia mediciones de la eficiencia usando el método termodinámico en una central con un caída pequeña, a pesar de que esta caída es mucho menor a la recomendado por la norma IEC 60041 las curvas de eficiencia de las pruebas concuerdan muy bien con la curva de diseño, comprobando que es posible realizar mediciones a centrales con caídas menores a 100 m, utilizando termómetros de alta precisión y en este caso con una condición donde no existían perturbaciones en la temperatura del agua, ya que la tubería forzada se encuentra enterrada en el subsuelo.

Con base en los trabajos anteriores es posible deducir que la aplicación del método termodinámico es factible para centrales con caídas menores a lo establecido en la norma IEC 60041, sin embargo, es importante tener en

cuenta las condiciones en las que se pretende aplicar el método, siendo éstas las condiciones que se encuentren en la central hidroeléctrica de Temascal.

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Una central eléctrica es una instalación capaz de transformar energía primaria (térmica, eólica, hidráulica, etc.) en energía mecánica, la cual, a su vez, mediante una posterior transformación producirá energía eléctrica que logrará satisfacer las necesidades y demandas de la sociedad (Mujal 2003).

El agua es uno de los elementos esenciales en el sector energético, de las fuentes de energía renovables, es en la actualidad el recurso más utilizado para la obtención de energía eléctrica. El agua como fuente de energía permite un almacenamiento y regulación en su uso, es por eso por lo que la energía hidroeléctrica es considerada (entre otras fuentes de energía renovables) como la de mayor calidad (Sanz 2008).

En las centrales hidroeléctricas, se utiliza la energía potencial del agua para accionar turbinas; según la altura útil, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Instalaciones de baja presión (hasta 25 *m* de altura),
- Instalaciones de mediana presión (de 25 *m* a 100 *m* de altura) e
- Instalaciones de alta presión (altura superior a 100 *m*) (Senner 1994).

De esta forma la potencia instalada y la energía producida con conceptos fundamentales de la producción de la energía hidroeléctrica, y ambos dependen directamente de la altura de la caída del agua y el caudal; se define como caída de agua a la distancia vertical recorrida por una masa de agua desde un determinado nivel superior a otro inferior; y como caudal al

volumen de agua por unidad de tiempo que atraviesa una superficie (Sanz 2008).

### 2.1.1 Concesión del agua en México

En México, el agua es empleada en diversas formas en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o producir e intercambiar bienes y servicios. En el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) dependiente de la CONAGUA, se registran los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios de aguas nacionales. Como se muestra en la Tabla 2.1, el REPGA tiene clasificados los usos del agua en diversos rubros.

Tabla 2.1 Agrupación de los usos del agua de acuerdo con el REPGA (CONAGUA 2015).

Clave	Rubro de clasificación del REPGA	Volumen concesionado ( $hm^3$ )
A	Agrícola inscrito + pendiente	58 43429
B	Agroindustrial	4
C	Doméstico	40
D	Acuacultura	1 114
E	Servicios	1 426
F1	Industrial	2 142
F2	Termoeléctricas	4 150
G	Pecuario	202
H	Público urbano	12 013
I	Múltiples	5 405
L	Comercio	0.1
L	Otros	0.5
	Subtotal consecutivo	84 9
J	Hidroeléctricas	178 622
	Subtotal no consecutivo	178 622
	Total	263 551

De acuerdo con información de la CONAGUA, a nivel nacional las Regiones Hidrológicas-Administrativas (RHA) denominadas XI Frontera Sur y IV Balsas tienen la concesión de agua más importante para su uso en hidroeléctricas (Ver tabla 2.2), esto debido a que en estas regiones se localizan los ríos más caudalosos de todo el país, según cifras oficiales el volumen de agua concesionado a nivel nacional para el uso de hidroeléctricas asciende a 178,622 millones de metros cúbicos. En el 2014 las plantas hidroeléctricas emplearon un volumen de agua de 133,018 millones de metros cúbicos, lo que permitió generar 37.5 TWh de energía eléctrica, que corresponde al 14.9% del total nacional.

Tabla 2.2 Volúmenes declarados para el pago de derechos por la producción de energía (CONAGUA 2015).

Número de RHA	Volumen de agua declarado ( $hm^3$ )									
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
I	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
II	3250.8	2928.6	3350.7	3404.7	3217.7	4140.6	3416.5	3032.7	2627.2	2456.3
III	11598.4	10747.0	11183.9	13216.7	11405.1	11912.1	11100.3	5176.6	6127.9	7475.4
IV	32141.0	21820.3	31099.4	30572.8	28059.6	34487.9	35539.9	32177.7	28126.2	29688.3
V	1890.3	1949.1	2139.6	2244.7	2063.4	3528.0	16313.8	2028.2	1716.9	26.3
VI	2073.6	2262.7	2889.6	1967.7	2960.4	2987.7	3350.1	3771.8	2556.8	2125.5
VII	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VIII	7361.0	4657.8	10516.6	13516.9	9030.9	11764.6	7741.4	5733.5	5598.0	10693.3
IX	1487.8	809.7	1105.3	2912.1	1441.0	1525.9	1243.0	1312.4	1273.5	1225.7
X	13978.5	17835.0	14279.1	14040.5	13673.7	15029.1	4254.6	17286.7	16463.1	12319.4
XI	41573.3	77245.7	46256.8	68793.3	64304.7	49406.9	81813.4	85197.3	48325.9	67007.6
XII	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
XII	31.0	39.1	10.6	0.0	18.8	0.5	0.0	0.0	0.3	0.5
<b>Total</b>	<b>115385.8</b>	<b>140294.9</b>	<b>122831.6</b>	<b>150669.4</b>	<b>136085.3</b>	<b>134783.3</b>	<b>164773.0</b>	<b>155716.9</b>	<b>112815.9</b>	<b>133018.3</b>

La capacidad instalada en centrales hidroeléctricas fue de 12,269 MW, que corresponde al 22.6% de la instalada en el país (CONAGUA 2015).

### 2.3 MÉTODO TERMODINÁMICO PARA MEDICIÓN DE RENDIMIENTO

Esta sección se centra en explicar los lineamientos que se tomaron en cuenta para el diseño del sistema propuesto en el presente trabajo, los

cuales están establecidos por la norma la norma de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC por sus siglas en inglés) 60041:1991 “Pruebas de recepción en central para determinar el rendimiento hidráulico de turbinas hidráulicas, bombas de almacenamiento y turbinas-bomba”.

### 2.3.1 Principio del método

El método termodinámico es un método absoluto, este resulta de la aplicación de la primera ley de la termodinámica, *“La energía no se crea ni se destruye, sólo se puede convertir en sus diversas formas”* (Rolle 2006) en la transferencia de energía entre el agua y el rodete a través del cual fluye, es decir, cualquier pérdida (excluyendo pérdidas volumétricas) resultará en un pequeño aumento de la temperatura.

La energía mecánica específica en el rodete es el cociente entre la potencia transmitida por el acoplamiento del rodete y el eje, y el caudal másico del agua ( $\rho Q$ ), este se define en la fórmula.

$$E_m = \frac{P_m}{\rho Q}$$

Dónde:

$P_m$  = Potencia mecánica del rodete.

$\rho$  = Densidad

$Q$  = Caudal (volumétrico)

No obstante  $E_m$  se puede determinar a partir de las variables de funcionamiento como son la presión, la temperatura, la velocidad y el nivel, así como de las propiedades termodinámicas del agua

El empleo de la energía mecánica específica en el rodete junto con el de la energía hidráulica específica de la turbina definida en la ecuación, permite determinar el rendimiento de la turbina sin la necesidad de medir el caudal.

$$E = \frac{p_{abs1} - p_{abs2}}{\bar{\rho}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + \bar{g}(z_1 - z_2)$$

Donde:

$E$  = Energía hidráulica específica de la turbina.

$p_{abs1}$  = Presión estática absoluta en la sección de referencia de alta presión.

$p_{abs2}$  = Presión estática absoluta en la sección de referencia de baja presión.

$\bar{\rho}$  = Promedio de las densidades de las secciones de referencia de alta y baja presión.

$v_1$  = Velocidad media en la sección de referencia de alta presión.

$v_2$  = Velocidad media en la sección de referencia de baja presión.

$\bar{g}$  = Promedio del valor de la aceleración de la gravedad de las secciones de referencia de alta y baja presión.

$z_1$  = Nivel en la sección de referencia de alta presión.

$z_2$  = Nivel en la sección de referencia de baja presión.

Algunas de las ventajas en la utilización del método termodinámico son la obtención del rendimiento de manera directa a partir del aumento de la temperatura debido a las pérdidas y evitar la medición del caudal.

### **2.3.2 Aspectos excluidos y restricciones**

La principal limitante de este método es su campo de aplicación, el cual de acuerdo con la norma es para centrales con caídas mayores a 100 m (donde  $E = 1000 \text{ JKg}^{-1}$ , esto debido a la variación de las mediciones en las secciones de referencia, las limitaciones de la instrumentación empleada y la importancia de los términos correctivos.

Algunos factores limitantes para su aplicación son (Huulas y Vinnog 2010):

- La medición de la temperatura (sensibilidad y estabilidad del termómetro).
- La estabilidad de la temperatura del agua que entra.
- La distribución de la temperatura a través de las secciones de medición.
- La experiencia y juicio del ingeniero de pruebas.

Sin embargo, bajo condiciones altamente favorables el campo de aplicación puede extenderse a caídas menores.

### **2.3.3 Instrumentación**

La norma IEC 60041:1991 no describe en detalle la instrumentación a utilizar para la realización de este método. No obstante, es de suma importancia que estos instrumentos satisfagan las condiciones establecidas por la norma (exactitud, precisión, intercambio térmico, etc.).

### **2.3.4 Rendimiento y energía mecánica específica**

El rendimiento de una turbina es la relación que existe entre la energía que produce la misma y la energía disponible.

Los rendimientos de una turbina se definen a continuación:

Rendimiento hidráulico

$$\eta_h = \frac{P_m}{P_h} = \frac{E_m}{E \pm \frac{\Delta P_h}{P_m} E_m}$$

Donde:

$\eta_h$  = Rendimiento hidráulico.

$P_h$  = Potencia hidráulica.

$\Delta P_h$  = Corrección de la potencia hidráulica.

Rendimiento mecánico

$$\eta_m = \frac{P}{P_m}$$

Donde:

$\eta_m$  = Rendimiento mecánico.

$P$  = Potencia mecánica de la turbina.

Rendimiento de la turbina

$$\eta = \frac{P}{P_h} = \eta_h \cdot \eta_m = \frac{E_m}{E \pm \frac{\Delta P_h}{P_m} E_m} \cdot \frac{P}{P_m}$$

Donde:

$\eta$  = Rendimiento de la turbina.

La obtención del valor de  $E_m$  puede realizarse de manera directa gracias al empleo del método termodinámico.

La eficiencia de la turbina es la razón de salida/entrada de potencia de la máquina. La entrada puede ser expresada como la energía hidráulica disponible para la turbina; La energía hidráulica específica  $E$  (energía por unidad de masa de agua que pasa a través de la turbina). La salida de la turbina es la potencia mecánica entregada al eje de la turbina. De acuerdo con la ley de la conservación de la energía, la energía entregada al eje puede encontrarse como la diferencia en la energía mecánica específica en el rodete  $E_m$  entre  $e_{m1}$  de entrada y la  $e_{m2}$  de salida de la turbina. Por lo tanto, la eficiencia de la turbina puede definirse como (Huulas *et al.* 2008).

$$\eta = \frac{E_m}{E}$$

Ahora bien, es posible determinar la energía hidráulica específica  $E$  mediante la determinación de la caída neta de la turbina.

$$E = gH$$

Por definición, la energía mecánica específica en el rodete está relacionada con  $P_m$ :

$$P_m = E_m(\rho Q)$$

A su vez  $P_m$  está definida por la ecuación:

$$P_m = P + P_{Lm} + P_f$$

Donde:

$P_{Lm}$  = Pérdidas de la potencia mecánica

$P_f$  = Potencia eléctrica suministrada a los equipos auxiliares de la turbina.

Si no hay ningún caudal añadido o extraído entre las secciones de referencia, es necesario calcular  $E_m$  mediante:

$$E_m = \bar{a}(p_{abs11} - p_{abs21}) + \bar{c}_p(\theta_{11} - \theta_{21}) + \frac{v_{11}^2 - v_{21}^2}{2} + g(z_{11} - z_{21}) + \delta E_m$$

Donde:

$\bar{a}$  = Factor isotérmico

$\bar{c}_p$  = Calor específico.

$\theta$  = Temperatura termodinámica en Kelvin.

$\delta E_m$  = Término correctivo de la energía mecánica específica en el rodete.

Los subíndices 11 y 21 hacen referencia a las magnitudes medidas en los distintos recipientes de medida. (no confundir con las secciones de referencia y/o las secciones de medida).

La expresión anterior de  $E_m$  es corresponde a expresión utilizada en la práctica.

Entonces, los valores de  $\bar{a}$  y  $\bar{c}_p$  (ver Anexo E, Tablas E.5 y E.6 de la norma IEC 60041) se corresponden con:

$$\frac{p_{abs11} + p_{abs21}}{2}$$

Y:

$$\frac{\theta_{11} + \theta_{21}}{2}$$

Para la diferencia de temperaturas, estas se pueden expresar de manera directa en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), como:

$$\vartheta_{11} - \vartheta_{21} = \theta_{11} - \theta_{21}$$

Donde:

$\vartheta$  = Temperatura en Celsius

Por lo tanto:

$$\vartheta = \theta - 273.15$$

### **2.3.5 Método de medida de la energía mecánica específica**

Es necesario medir los valores que definen a la energía mecánica específica  $E_m$  en recipientes especialmente diseñados con tomas para medición de la

presión y temperatura, ya que estos no se pueden determinar directamente en el flujo principal.

El procedimiento consiste en extraer agua, generalmente entre  $0.1 \times 10^{-3} m^3 s^{-1}$  (6 l/min) y  $0.5 \times 10^{-3} m^3 s^{-1}$  (30 l/min) cuando las secciones de medida se encuentran sometidas a presión, es importante mencionar que el caudal extraído debe comprobarse constantemente con una precisión en torno al  $\pm 5\%$ .

A su vez, la temperatura del agua sustraída debe ser medida mediante termómetros con una exactitud de al menos  $\pm 0.05 K$  y de una sensibilidad de  $0.01 K$ . Es recomendable la utilización de un registrador.

El agua que es extraída se debe llevar a un recipiente de medida a través de un conducto calorifugado a fin de que no exista intercambio de calor alguno con el exterior.

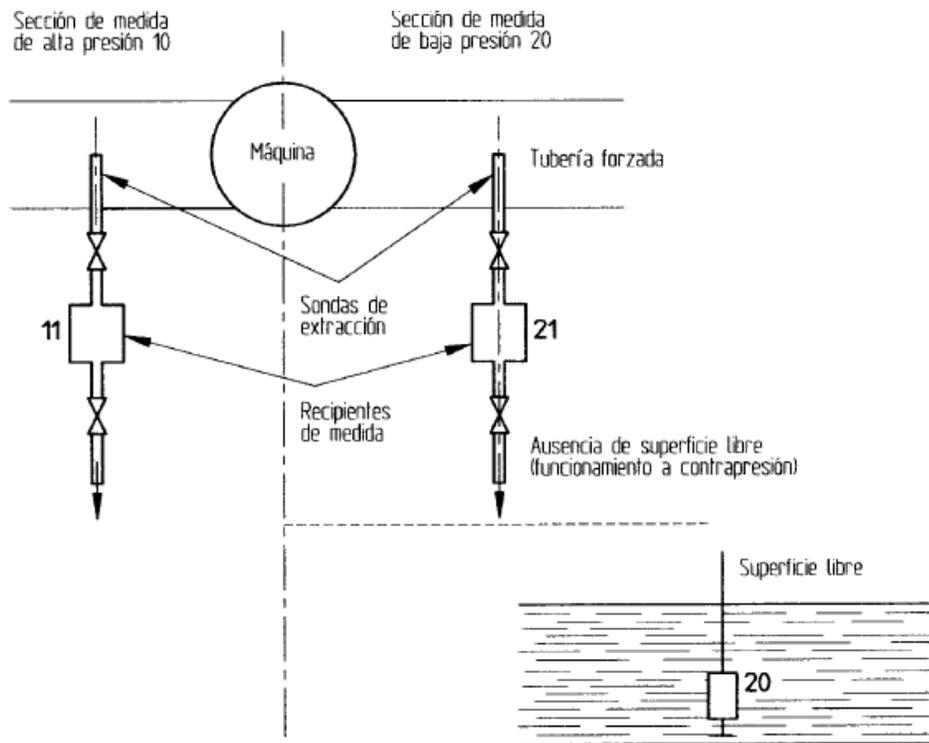


Figura 2.1. Localización de los recipientes de medida (IEC 60041:1991).

En el esquema anterior (Figura 2.1) se muestra la ubicación de los recipientes de medida con respecto a las diferentes secciones de medida (alta y baja presión).

Cada una de las variables que determinan a  $E_m$  se deben medir conforme a lo siguiente: los términos de presión y temperatura presentados en la ecuación deben de obtenerse utilizando algunos de los dos métodos para la determinación mecánica específica (método de operación directo y el método de operación por expansión parcial).

En los recipientes de medida se deben de medir los valores de las velocidades  $v_{11}$  y  $v_{21}$ , a su vez los niveles  $z_{11}$  y  $z_{21}$  deben corresponder a los centros de gravedad de los recipientes, siendo esto importante ya que los valores de la presión deben expresarse con referencia a dichos niveles.

### ***Método de operación directo***

La característica principal de este método es el paso directo del agua desde la tubería de presión en el lado de alta presión de la máquina hacia el recipiente de medida evitando la expansión del líquido al mínimo en la medida de lo posible.

Las variables que determinan a  $E_m$  se deben de obtener de la siguiente manera:

Para el término correspondiente a la presión  $\bar{a}(p_{abs11} - p_{abs21})$  se requieren manómetros o transductores de presión de gran precisión. Es recomendable que el mismo instrumento se utilice para la medida de  $E_m$  y  $E$ .

Los valores de presión y temperatura deben de medirse de manera simultánea y a intervalos de tiempo regulares.

Por último, es importante mencionar que el campo de aplicación de este método es general por lo que debe ser considerado como el método principal (Huulas y Vinnog 2010) (por encima del método de operación por expansión parcial) ya que es el más utilizado en la práctica.

### ***Especificaciones de la sonda de extracción y recipiente de muestreo.***

Como se mencionó anteriormente para el cálculo de  $E_m$  es necesario extraer agua directamente del flujo principal y conducirla hasta un recipiente aislado térmicamente dónde se realizan las mediciones de temperatura y presión.

Estas detecciones de agua se deben realizar utilizando una sonda colocada perpendicularmente en la tubería de presión, penetrando en la misma. La

sonda tiene que contar con un orificio perfectamente liso, cuyo diámetro debe ser igual al diámetro interno de la sonda, este orificio estará orientado en dirección aguas arriba. Debe de existir una distancia mínima entre el orificio a la pared interna de la tubería de presión, la cual será de al menos 0.05 m.

La sonda debe contar con una marca que permita identificar y orientar el orificio correctamente, a la vez esta estará diseñada para evitar vibraciones y/o roturas.

El diámetro mínimo interno de la sonda tiene que ser de al menos 8 mm, mientras que el diámetro externo en la proximidad del agujero de extracción puede ser de entre 15 mm y 40 mm; este se puede incrementar gradualmente hacia la pared interna a fin garantizar suficiente resistencia mecánica.

La velocidad del flujo de agua dentro de los recipientes de medida debe ser muy pequeña y debe producirse una mezcla correcta del fluido antes de que este pase alrededor de los termómetros por lo que los recipientes deben ser diseñados de tal forma que se cumplan estas condiciones.

Es necesario la utilización de aislamiento térmico en todos los elementos de los circuitos hidráulicos con el objetivo de que la energía total del fluido extraído sea constante.

### ***Secciones de medida***

En Figura 2.2 se muestra la representación esquemática general de las secciones de referencia para una turbina hidráulica.

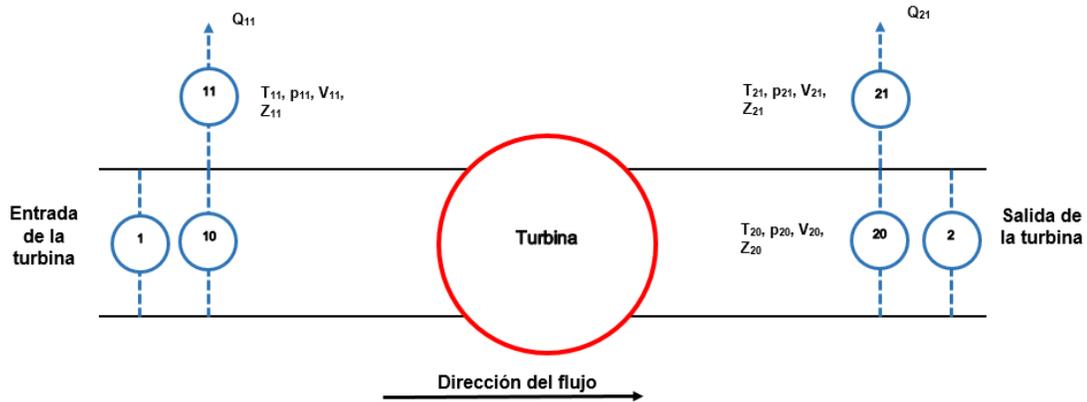


Figura 2.2 Representación esquemática de las secciones de referencia y medida.

Donde:

- 1 = Sección de referencia de alta presión.
- 2 = Sección de referencia de baja presión.
- 10 = sección de medida de alta presión.
- 20 = Sección de medida de baja presión.
- 11 = Recipiente de medida en la sección de alta presión.
- 21 = Recipiente de medida en la sección de baja presión.

Los subíndices 11 y 21 que acompañan a las variables de temperatura, presión, velocidad, nivel y caudal hacen referencia al recipiente dónde estas son medidas.

Las secciones de medida elegidas para la determinación de  $E_m$  no necesariamente coincidirán con las secciones de referencia de alta y baja presión.

En una turbina la ubicación de las tomas en la sección de medida del lado de alta presión debe ser cercana a la máquina. Está prohibida la ubicación de estas tomas en la estela inmediata de una válvula de mariposa.

El número de tomas necesarias variará de acuerdo con el diámetro de la tubería de presión. Para diámetros menores a 2.5 m una única toma es suficiente, para diámetros entre 2.5 m y 5 m se recomienda dos tomas mientras que para diámetros mayores a 5 m o tuberías cuya longitud sea menos a 150 m es recomendable el uso de entre tres y cuatro tomas.

Para el lado de baja presión, la sección de medida debe localizarse a una distancia del rodete de al menos cinco veces el máximo diámetro del rodete. Es importante mencionar que es necesaria una exploración de la temperatura en esta sección en al menos 6 puntos.

En una sección de medida inaccesible, es decir, dónde la utilización de circuitos de detracción de caudal no es factible, es preciso el uso de dispositivo de toma que se localizará al interior del tubo de aspiración ya que es la única posibilidad para explorar la temperatura en esa sección.

El dispositivo de muestreo puede presentar variaciones de acuerdo con las necesidades de cada practicante del método termodinámico, ejemplo de ello son los siguientes:

- Tubos perforados que recogen caudales parciales conectados a un recipiente de muestreo común donde miden los valores de temperatura, presión y velocidad.
- Marcos de muestreo donde se colocan los instrumentos para medir las variables que determinan la energía mecánica específica: transductores de presión, flujómetros, y termómetros.

## 2.5 DISEÑO DE INGENIERÍA

Diseñar es la acción de elaborar un plan para resolver un problema o satisfacer una necesidad, cuyo éxito resultará en la creación de un producto físico real, y a su vez este debe ser funcional, seguro, confiable, útil, etc. (Budynas y Nisbet 2008).

El diseño de ingeniería consiste en generar planos de equipos, sistemas o procesos de manera sistemática e inteligente, cuyas formas y funciones satisfagan las necesidades de los usuarios a la vez que cumplen con algunas restricciones en especificadas.

### 2.5.1 Fases del proceso de diseño de ingeniería

En la figura 2.3 se muestran las distintas fases que conforman el diseño de ingeniería (Dym y Little 2002):

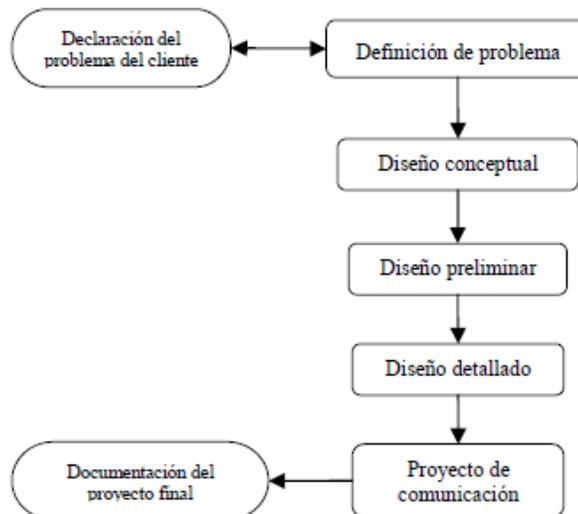


Figura 2.3 Modelo descriptivo de 5 etapas del proceso de diseño (Dym y Little 2002).

- Definición del problema: Es la primera etapa del proceso y está estrechamente relacionada con el reconocimiento de un problema y/o necesidad. La definición debe ser más detallada en comparación con el reconocimiento o enunciado del problema, además debe contener las especificaciones del objeto a diseñar.
- Diseño conceptual: en esta fase se generan diferentes conceptos para alcanzar los objetivos del cliente, se definen funciones principales, dimensiones, componentes estructurales y los medios para alcanzar los objetivos.
- Diseño preliminar: Esta etapa es de carácter más técnico, por ello es posible de utilizar cálculos matemáticos, se realiza un modelado y análisis del diseño elegido para finalizar con una evaluación de este.
- Diseño detallado: Aquí se perfecciona y optimiza el diseño elegido, así mismo, es necesario nombrar y fijar los detalles del diseño.
- Comunicación del diseño: En esta última etapa se realiza la documentación del diseño final que incluye un informe técnico, planos, especificaciones y características de fabricación.

El presente trabajo comprende las primeras tres etapas del diseño de ingeniería: comenzando por la determinación de objetivos, condiciones de operación, etc., hasta el análisis y evaluación del sistema propuesto a través de simulaciones CFD.

## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

### 3.1 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

El objetivo principal del presente trabajo es diseñar un sistema que permita la determinación del caudal utilizado en una central hidroeléctrica a través de la medición de su rendimiento usando el método termodinámico. Se espera que dicho sistema pueda ser aplicado en centrales con caídas menores a los 100 *m*. De igual manera este sistema debe cumplir con los lineamientos establecidos en la norma IEC 60041.

Para el diseño del sistema se decidió considerar la central hidroeléctrica de Temascal, en específico de la geometría de la unidad 4, esta se encuentra ubicada en el municipio de San Miguel Soyaltepec, Oaxaca.

En la Tabla 3.1 se muestra información relevante de la turbina (Castro 2011).

Tabla 3.1 Condiciones de operación de la turbina.

<b>Tipo</b>	Francis vertical
<b>Diámetro del rodete</b>	3.49 <i>m</i>
<b>Flujo nominal</b>	94.8 <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>s</i>
<b>Velocidad rotacional</b>	180 <i>RPM</i>
<b>Velocidad específica</b>	310.49
<b>Potencia de diseño</b>	38.5 <i>MW</i>
<b>Caída de diseño</b>	56.5 <i>m</i>

### **3.1.1 Elección del método de medición de la energía mecánica específica**

De acuerdo con la norma, existen dos métodos para la medición de la energía mecánica específica: el método de operación directo y el método de operación por expansión parcial. Se optó por trabajar con el método de operación directo mencionado en la sección 2.3.5., ya que su campo de aplicación es general, además de ser el más utilizado en la práctica y de acuerdo con las recomendaciones mencionadas en el capítulo anterior, el método directo debe ser considerado como método primario.

### **3.1.2 Definición de las secciones de medida**

A continuación, se describen los criterios utilizados para la ubicación de los puntos de muestreo tanto para la sección de alta presión, así como la de baja presión.

La descripción de las secciones de medida, así como los lineamientos para la ubicación de las tomas para el muestro se mencionan en 2.3.5.

#### ***Puntos de muestreo para la sección de alta presión***

La norma indica que los puntos de muestreo deben ser situados cerca de la máquina, por lo que se decidió que dichos puntos fueran ubicados antes del caracol, ya que es necesario que la muestra de agua sea tomada directamente desde la tubería forzada.

Con base en la medición del flujo a través del método de Gibson realizada en la central de Temascal (Castro 2011), dónde fue necesario establecer secciones de medida de acuerdo con este método (Figura 3.1), se decidió

utilizar los datos de la tubería en la sección 2-2 (diámetro, presión, caudal y nivel).

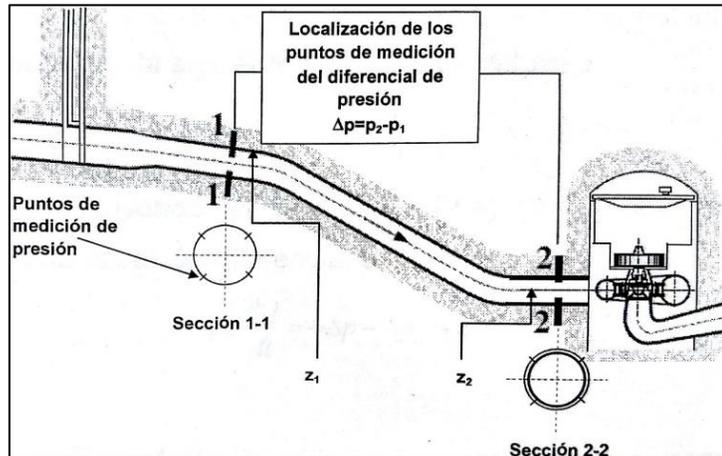


Figura 3.1 Esquema de los puntos de medición en la tubería de presión (Castro 2011).

El área de la tubería de presión en la sección 2-2 es de  $20.98 \text{ m}^2$ , a partir de que aquí se determinó su diámetro el cual mide aproximadamente  $5.17 \text{ m}$  por lo que se sugiere el uso de 4 tomas o puntos de muestreo.

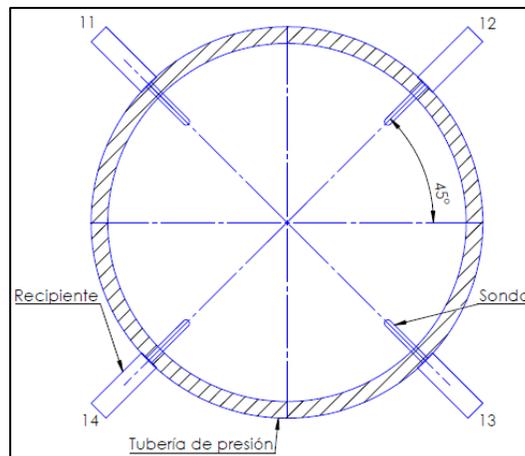


Figura 3.2 Localización de los puntos de muestreo en la tubería de presión.

En la Figura 3.2 se puede observar que los dispositivos de muestreo se posicionan a  $45^\circ$  con respecto a los ejes de simetría. Las sondas y recipientes de muestreo serán descritos en los apartados 3.4.1 y 3.4.2 respectivamente.

### ***Puntos de muestreo para la sección de baja presión***

Al tratarse de una sección de medida cerrada los puntos de muestreo en la sección de baja presión se deben situar a una distancia del rodete de al menos cinco veces el máximo diámetro de este, con la finalidad de que se asegure una mezcla correcta del agua.

El diámetro máximo del rodete es de  $3.49\text{ m}$  por lo que la distancia mínima a la que deben ser ubicados los puntos de muestreo es de  $17.45\text{ m}$  (Figura 3.3).

Siendo esta sección de medida inaccesible la única manera de poder explorar las temperaturas es a través de un dispositivo de toma de muestra en el interior del conducto.

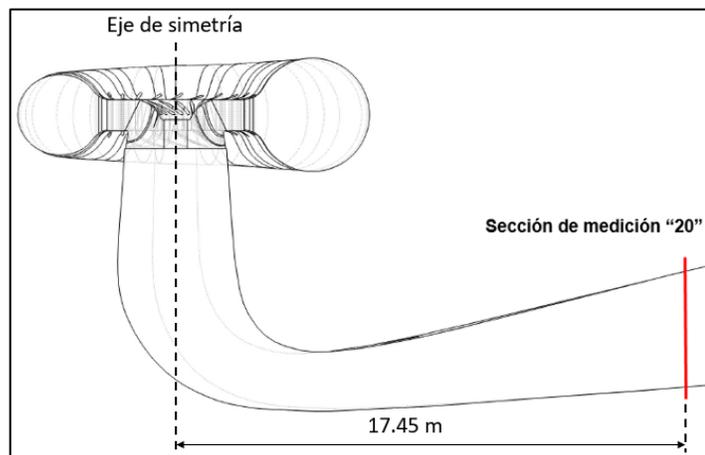


Figura 3.3 Sección de medida en el lado de baja presión.

La descripción del dispositivo de muestreo para la sección de baja presión se detalla en la sección 3.4.3.

## **3.2 SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN**

Antes de comenzar a diseñar el recipiente de muestreo, así como la sonda de extracción es importante tomar en cuenta la selección de la instrumentación a utilizar, ya que las dimensiones de estos instrumentos son consideradas para el diseño de las tomas de los dispositivos de muestreo.

Son tres las variables físicas que deben medirse dentro del contenedor de muestreo: la presión, la temperatura y la velocidad.

A continuación, se describen los equipos de medición propuestos para cada una de las variables mencionadas anteriormente.

### **3.2.1 Medición de la temperatura**

De acuerdo con lo establecido por el método de operación directo para la medición de la temperatura se requieren termómetros de gran precisión. Con base a la literatura consultada, muchos de los practicantes del método termodinámico optan por la utilización de detectores de temperatura resistivos (RTD por sus siglas en inglés) del tipo Pt-100.

El principio de funcionamiento de un RTD consiste en el cambio de la resistencia del material con el que está hecho al exponerse a un aumento de temperatura. Los RTD cuentan con una excelente exactitud para un amplio rango de temperatura.

Un sensor Pt-100 es un tipo específico de RTD, están fabricados con platino y su característica más importante es tener una resistencia de 100 Ohm a una temperatura de 0 °C, siendo así el tipo más común de RTD.

El sensor sugerido para su implementación es una sonda Pt-100 modelo SE012 marca Pico (Figura 3.4), cuyas características de muestran a continuación (Tabla 3.2):



Figura 3.4 Sonda Pt-100 SE012.

Tabla 3.2 Características de la sonda Pt-100 SE012.

<b>Rango de temperatura</b>	-50 a 250 °C
<b>Precisión</b>	±0.03 °C
<b>Dimensiones</b>	
Longitud	150 <i>mm</i>
Diámetro	4 <i>mm</i>
Cable	2 <i>m</i>
<b>Material</b>	Sonda de acero inoxidable, cable PTFE
<b>Mango</b>	No
<b>Conector</b>	Mini- DIN de 4 pines

### 3.2.2 Medición de la presión

Siguiendo el mismo argumento de la utilización del método directo, es necesario el uso de transductores de presión de alta precisión.

Se sugiere el empleo de un transductor de presión marca Endress+Hauser modelo Cerabar T PMC131 (Figura 3.5), con él pueden medirse presiones absolutas y relativas en líquidos, vapores y gases, cuenta con un sensor capacitivo de cerámica que es muy preciso, resistente a la corrosión y abrasión.



Figura 3.5 Transductor de presión T PMC 31.

Su principio de funcionamiento se basa en que la presión a medir causa una ligera deformación en el diafragma sensor y esta es medida por el equipo, dicha deformación es proporcional a la presión medida. El transductor debe conectarse con un sistema de alimentación y amplificación. Sus características se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Características del transductor de presión T PMC31.

<b>Producto</b>	Líquidos, vapores y gases
<b>Célula</b>	Célula cerámica (sin aceite de relleno)
<b>Estabilidad sobrecarga</b>	Hasta factor 40
<b>Limites campo de medida</b>	100 <i>mbar</i> (1.5 <i>psi</i> ), a 40 <i>bar</i> (600 <i>psi</i> )
<b>Temperatura de proceso</b>	-20 a +100 °C
<b>Precisión</b>	0.5%

### 3.2.3 Mediciones auxiliares

Es necesario comprobar el caudal detraído, por lo que el uso de un caudalímetro es necesario.

Se sugiere el uso de un sensor de caudal mecatrónico modelo SBT634 marca ifm electronic gmbh (Figura 3.6), estos operan según el principio del pistón sostenido sobre un muelle. El pistón, situado en el asiento de la válvula en la carcasa, es elevado por el caudal del fluido contra la fuerza del muelle. La posición del pistón es detectada por el sensor con ayuda de un detector magnético



Figura 3.6 Caudalímetro SBT634.

La fuerza del muelle provoca un retorno seguro del pistón en caso de disminución de caudal en la posición de salida. Con ello se permite un montaje del sensor de caudal independiente de la posición y se evita el reflujó.

Cuenta con un tornillo de ajuste que permite ajustar y fijar los puntos de conmutación fácilmente. Su robusto diseño mecánico permite su utilización en entornos agresivos. Estos equipos están exentos de mantenimiento.

Algunas características del sensor SBT634 se muestran a continuación (Tabla 3.4):

Tabla 3.4 Características del caudalímetro SBT634.

Escala de medida	0.3 l/min a 50 l/min
Aplicaciones	Fluidos líquidos (agua)
Temperatura del fluido	10 a 180 °C
Repetibilidad	1% de valor final
Exactitud	±5% del valor final

### 3.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Debido a la cantidad de datos a obtener durante la medición de las distintas variables es necesario contar con un sistema que sea nos permita el manejo de todos estos datos de manera simultánea.

Se propone la utilización de un dispositivo USB DAQ, los cuales son capaces de ofrecer medidas reales de alto rendimiento, sus aplicaciones pueden ser desde su uso para un registro de datos simple hasta sistemas embebidos. Una de sus ventajas es que cuentan con la simplicidad y portabilidad del USB. Y además de que es un equipo que se tienen en el CIICAp.

#### 3.3.1 Descripción del dispositivo usb-6343

Se trata de un dispositivo DAQ multifunción (Figura 3.7) de la serie X para USB, cuenta con una cubierta mecánica, y hace uso de la tecnología NI-STC3, la cual ofrece funciones avanzadas de temporización, tareas de medida repetidas y cuatro contadores /temporizadores.



Figura 3.7 Dispositivo DAQ USB-6343.

Hace uso del software controlador NI-DAQmx de hilos múltiples, el cual es compatible con las siguientes versiones (o posteriores) de software de aplicación: LabVIEW 8.5, LabWindows™/CVI 8.1, Measurement Studio 8.0.1

y SignalExpress 2.x. También compatibles con ANSI C/C++ y Microsoft Visual Studio .NET.

Las características del UBS-6343 se enlistan a continuación:

- Conectividad BNC y opciones OEM disponibles.
- 32 entradas analógicas (16 en BNC variante), 500 *kS/s*, resolución de 16 bits,  $\pm 10 V$ .
- 4 salidas analógicas, 900 *kS/s*, resolución de 16 bits,  $\pm 10 V$ .
- 48 líneas de E/S digital (32 temporizadas por hardware hasta 1 *MHz*).
- Cuatro contadores/temporizadores de 32 bits para PWM, codificador, contar eventos y más.
- Temporización y disparo avanzados con la tecnología NI-STC3 de temporización y sincronización.
- Soporte para Windows 7/Vista/XP.

### **3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE TOMAS DE MUESTRAS**

Realizar la medición de la presión, temperatura, y la velocidad directamente en el flujo principal, representa muchas dificultades. Como se mencionó anteriormente (2.3.5) es necesario el uso de sondas de extracción, así como de recipientes donde dichas magnitudes puedan ser medidas.

En las siguientes secciones se describe las características de diseños de los dispositivos antes mencionados.

#### **3.4.1 Sonda de extracción**

La sonda de extracción es el dispositivo utilizado para sustraer agua de la tubería de presión. La Figura 3.8 muestra el diseño de la sonda.

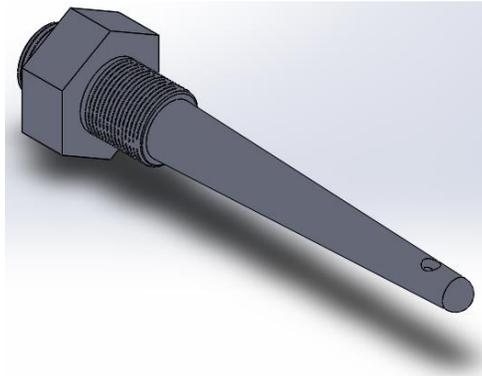


Figura 3.8 Sonda de muestreo diseñada.

La sonda cuenta con un orificio en el extremo por donde se obtendrá la muestra de agua, este orificio tiene un diámetro igual al diámetro interno de la sonda, es cual es de  $8\text{ mm}$  (mínimo recomendado por la norma).

El diámetro externo de la sonda comienza con una longitud de  $15\text{ mm}$ , este se incrementa gradualmente en dirección a la base de la sonda, siendo el diámetro final en la base de  $33.25\text{ mm}$ , seguida de una rosca que se utilizará para montarla al tubo de presión (utilizando una tuerca de  $1\ 3/8''$ )

Al final de la sonda, se observa una rosca con un diámetro de  $33.25\text{ mm}$  ( $G1''$ ) con el fin de facilitar el montaje de una válvula de cierre de alta presión.

Las dimensiones de la sonda se muestran en la Figura 3.9, el cual se trata de un diseño propio basándose en las especificaciones de la norma IEC 60041.

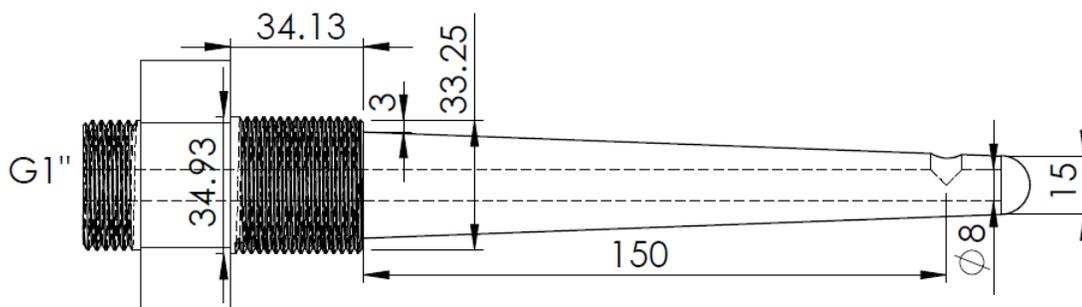


Figura 3.9 Dimensiones de la sonda de muestreo (en mm).

### 3.4.2 Recipiente de muestreo

Para la creación de la geometría del recipiente se tomaron en cuenta algunos datos relevantes de la geometría del caracol, del informe parcial No. 77P/DM/CIICAp “Resultados de la medición de flujo y cálculo de eficiencia de la unidad No. 4 en la C.H. Temascal”, así como los lineamientos de la norma IEC 60041

Tabla 3.5 Información de la tubería de presión en la sección 11.

Datos estimados en la tubería de presión	
Área	20.98 m <sup>2</sup>
Caudal	89.67 m <sup>3</sup> /s
Presión	390 kPa
Velocidad* ( $V = Q/A$ )	4.274 m/s

La elección del método de operación directa para la medición de la energía mecánica específica significa que debe realizarse el paso directo del agua desde la tubería de presión (lado de alta presión) al recipiente de muestreo con la mínima expansión posible, por lo tanto, para la entrada del recipiente, se consideró un diámetro de 8 mm que correspondiente al diámetro interno de la sonda de extracción. Además, para la salida de este se consideró un

diámetro de 14 *mm* que corresponde al diámetro interno de la conexión del caudalímetro.

Para la determinación de las dimensiones de la pared interna del recipiente se consideraron las siguientes suposiciones:

- La velocidad se mantiene constante desde la sonda de extracción hasta la entrada del recipiente de muestreo.  $V = 4.2740 \text{ m/s}$ .
- La velocidad del flujo del agua en el interior del recipiente debe ser muy pequeña.
- Debe existir una buena mezcla del flujo antes de que este pase alrededor del RTD.

La longitud de la pared interna se consideró de 200 *mm* como mínimo, ya que la longitud de la sonda PT100 propuesta es de 150 *mm*, esperando que los 50 *mm* restantes fueran suficiente para una correcta mezcla del flujo dentro del recipiente.

Al tener que ser la velocidad del fluido muy pequeña al interior del recipiente era necesario considerar el caudal que entra al mismo, el cual se calculó a partir de la relación

$$Q_e = A_e \cdot V_e$$

Donde:

$Q_e$  = Caudal a la entrada del recipiente.

$A_e$  = Área de entrada del recipiente.

$V_e$  = Velocidad del agua a la entrada del recipiente.

Para  $A_e = 5.0265 \times 10^{-5} \text{ m}^2$  y  $V_e = 4.2740 \text{ m/s}$ , el caudal resultante a la entrada sería  $Q_e = 2.1483 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tomando en cuenta el diámetro a la salida del recipiente (14 *mm*) se calculó su área siendo esta de  $A_s = 1.5394 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ . Así también la norma establece que el caudal extraído debe ser de entre  $0.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  a  $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , por lo que a partir del área a la salida y utilizando el mínimo caudal extraído estipulado por norma se obtuvo la velocidad mínima.

$$V_s = \frac{Q_s}{A_s}$$

Donde:

$V_s$  = Velocidad del agua a la salida del recipiente.

$Q_s$  = Caudal a la salida del recipiente.

$A_s$  = Área a la salida del recipiente.

Por lo tanto, la velocidad mínima es  $V_s = 0.6496 \text{ m/s}$  y usando esta velocidad mínima, así como el caudal de entrada se calculó el área de la pared interna del recipiente, así como su diámetro:  $A_i = 3.3071 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ , por lo tanto, su diámetro interno sería de al menos 20.52 *mm*, el cual finalmente se estableció en 21 *mm*.

El diámetro para la salida de la toma de presión se tomó del diámetro mínimo establecido de la conexión del transductor de presión (conexión al proceso de G 1/2") que corresponde a 18.36 *mm*.

Por último, un orificio de 4 *mm* de diámetro en el extremo opuesto a la entrada del recipiente fue tomando en cuenta para la introducción de la sonda PT100 para la toma de temperatura además de una rosca donde esta pueda ser montado con ayuda de una cabeza de conexión.

El diseño del recipiente de muestreo se observa en la Figura 3.10.

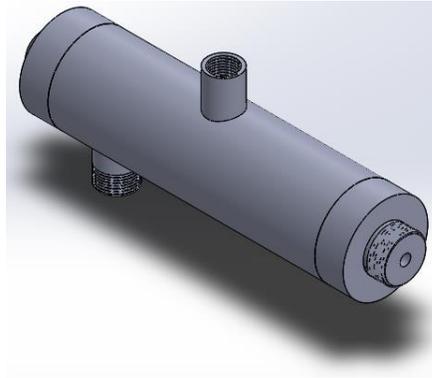


Figura 3.10 Recipiente de muestreo diseñado.

La geometría del recipiente de muestreo se muestra a continuación (Figura 3.11).

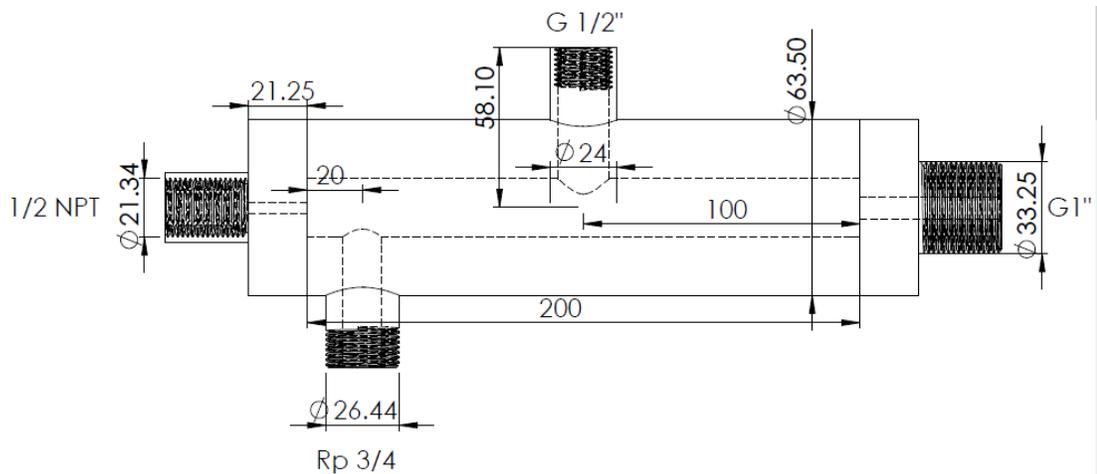


Figura 3.11 Dimensiones del recipiente de muestreo (en mm).

### 3.4.3 Montaje del dispositivo de muestreo para la sección de alta presión.

La Figura 3.12 muestra la sonda y el recipiente de muestreo montados junto con los instrumentos, el dispositivo se representa sin el aislamiento térmico requerido en la norma.

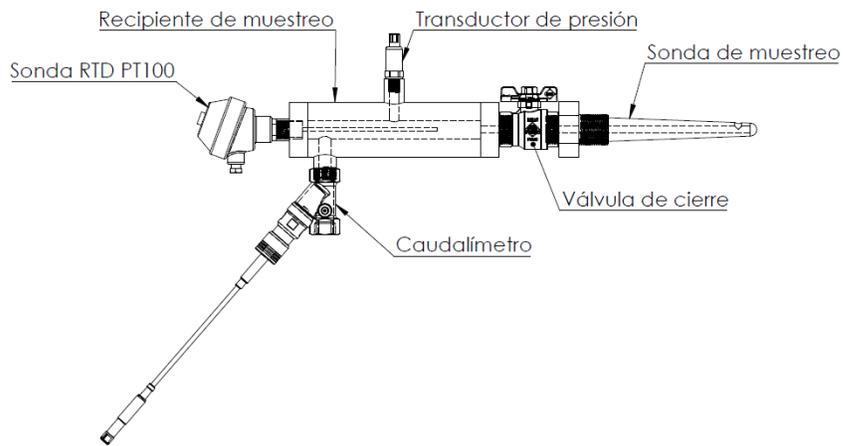


Figura 3.12 Dispositivo de muestreo para la sección de referencia del lado de alta presión.

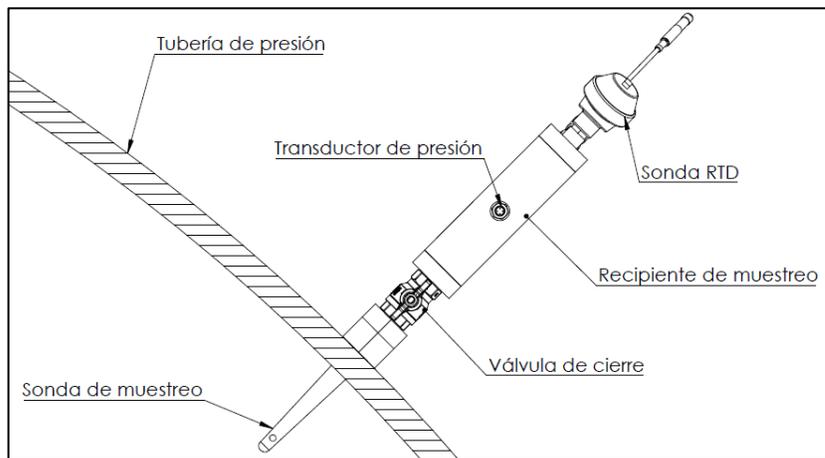


Figura 3.13 Dispositivo de muestreo montado en la tubería de presión.

Por último, se muestra esquemáticamente la sonda introducida de manera perpendicular en el tubo de presión, es posible apreciar que el orificio debe estar orientado de manera tal que quede frente al flujo (Figura 3.13).

### 3.4.4 Marco de muestreo para sección de baja presión

Debido a que la sección de medición en el lado de baja presión es cerrada y esta es inaccesible la única posibilidad para explorar las temperaturas es a través de un dispositivo de toma ubicado en el interior del conducto.

Se consideró hacer uso de termómetros, transductores de presión y un correntómetro directamente en el tubo de aspiración. La Figura 3.14 se muestra la distribución de los instrumentos en esta sección.

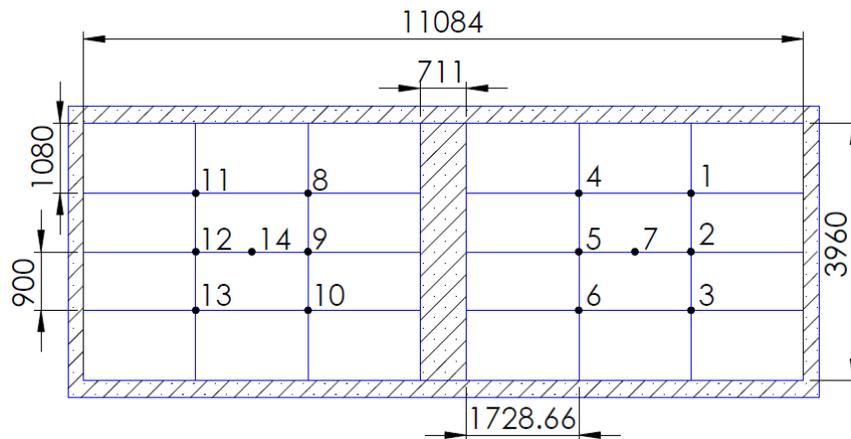


Figura 3.14 Distribución de instrumentos en la sección de baja presión.

Donde los puntos 2, 5, 9 y 12 pueden ser utilizados para colocar transductores de presión mientras que en el resto de los puntos se colocarán los termómetros para la exploración de la temperatura en esta sección.

Además de los lineamientos establecidos por la norma es importante tener en cuenta alguna de estas condiciones (Alič y Dolenc 2016):

- Los perfiles de velocidad deben lo más estables que sea posible.
- El agua debe de estar bien mezclada en la sección de medición.

- La formación de contraflujos en el tubo de aspiración.
- Es aconsejable mantener la velocidad del flujo por debajo de  $2.5 \text{ m/s}$ , para que no influya en la medición de la temperatura.

### 3.5 SIMULACIÓN DE FLUJO EN EL RECIPIENTE DE MUESTREO

Con ayuda de la Dinámica de Fluidos computacional se procedió a corroborar el diseño propuesto en la sección 3.4.2. El posterior análisis de resultados nos permite observar el comportamiento de las magnitudes medidas en su interior (velocidad, temperatura, presión).

#### 3.5.1 Preprocesamiento

Para la simulación del flujo en el interior del recipiente, se consideró la geometría de sus paredes internas, la cual se puede apreciar en la Figura 3.15 con ayuda de un corte transversal.

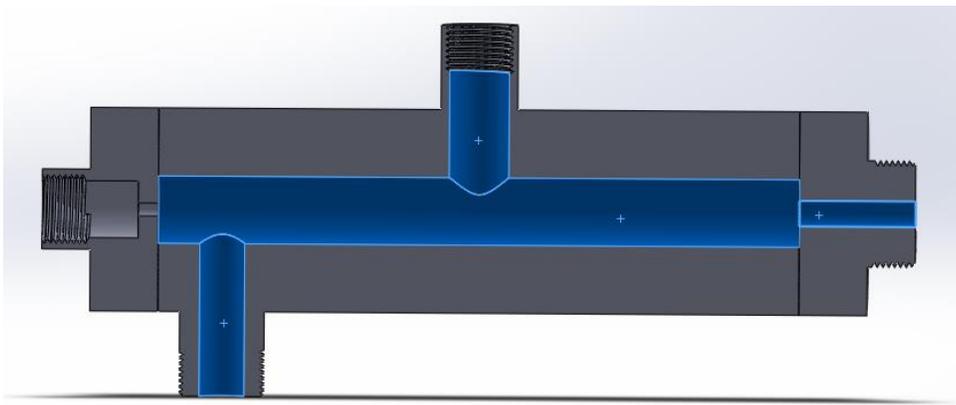


Figura 3.15 Interior del recipiente de muestreo.

Dicha geometría se creó independientemente con ayuda de SolidWorks, para su posterior importación y de esa manera realizar un análisis de flujo de fluidos mediante el uso de Fluent en Workbench.

Se importó la geometría a través de la herramienta DesignModeler, donde la misma se especificó como un cuerpo fluido.

Para la generación de la malla se utilizó la aplicación ANSYS Meshing, se etiquetaron los límites en la geometría mediante la creación de selecciones con el nombre de la entrada y salida del recipiente de muestreo: entrada de velocidad y salida de presión. Se ajustaron algunos parámetros de mallado para obtener una malla fina, como el centro de relevancia, el alisamiento y en ángulo normal de curvatura. El mallado del interior del recipiente se muestra en la Figura 3.16.

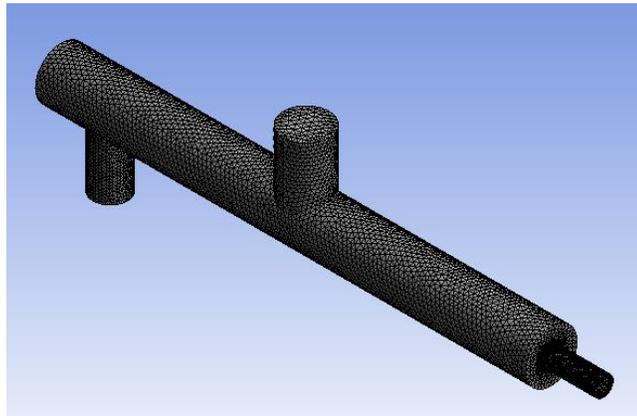


Figura 3.16 Mallado del interior del recipiente.

Una vez que se cuenta con la malla computacional para para la geometría del recipiente, es necesario configurar el análisis CFD utilizando CFX. Dicha configuración se enlista a continuación (Tabla 3.6):

Tabla 3.6 Configuración de la simulación para el recipiente de muestreo.

	Dominio
Ubicación	Fluido
Tipo	Fluido
Material	Agua a 298.15 K
Movimiento del dominio	Estacionario
Presión de referencia	1 atm
Transferencia de calor	Energía total
Modelo de turbulencia	k-ε

Los parámetros de inicialización de dominio son los siguientes:

- El tipo de velocidad cartesiano, se establecieron los valores de los componentes cartesianos en automático, la escala de velocidad en 0  $m/s$ , mientras que la presión estática, la temperatura y la turbulencia también se establecieron en automático.

Las condiciones de frontera son las siguientes:

- Entrada: Se localiza en la entrada de velocidad, con un régimen de flujo subsónico, presión total (estable) de 390.09  $kPa$  y el parámetro de turbulencia en 5%.
- Paredes: El interior del recipiente se especifica como pared, donde no existe deslizamiento, con textura pulida y sin transferencia de calor.
- Salida: Se localiza en la salida de presión, con régimen subsónico, y salida de flujo másico de 0.2142  $kg/s$ .

### **3.5.2 Procesamiento**

Los parámetros básicos del control de solución son los siguientes:

- Esquema de advección: Alta resolución.
- Números de turbulencia: primer orden
- Escala de tiempo: automática
- Control de convergencia: máximo 1,000 iteraciones.
- Criterio de convergencia: residual tipo RMS con objetivo de  $1 \times 10^{-4}$ .

Una vez iniciado el cálculo de la solución, CFX detendrá la solución cuando los residuales alcancen los valores especificados o después de las 1,000 iteraciones.

Los resultados de la simulación pueden visualizarse con la herramienta CFX-Post, los cuales se analizarán en la sección 4.1.

### **3.6 SIMULACIÓN DE FLUJO EN LA TURBINA**

Al ya contar con la geometría del rodete y del tubo de aspiración, así como del mallado (Figura 3.17), se procedió al realizar una simulación numérica, con el fin de obtener información del flujo en la sección de medición de baja presión.

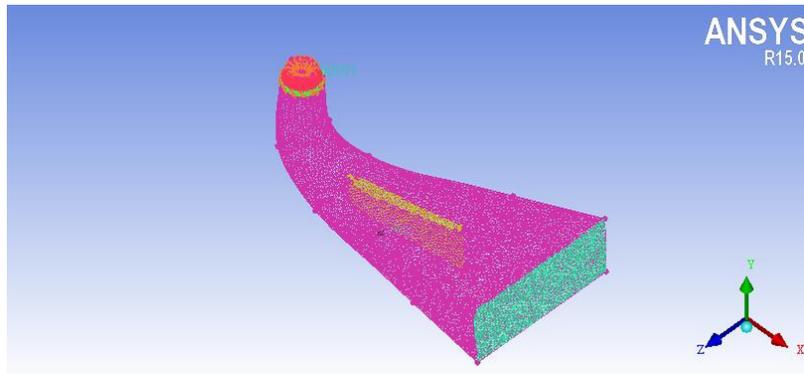


Figura 3.17 Mallado del acoplado rodete/tubo de aspiración.

El preprocesamiento, procesamiento y post-procesamiento se realizó utilizando el programa CFX 15.0.

### 3.6.1 Preprocesamiento

Basado en las simulaciones realizadas anteriormente por Castro (2011), se busca replicar los resultados una vez más esta vez considerando la transferencia de calor, lo que permitiría una exploración de temperatura en el tubo de aspiración. La configuración de la simulación se muestra a continuación (Tabla 3.7):

Tabla 3.7 Configuración de simulación del acoplado rodete/tubo de aspiración.

	Dominio 1	Dominio 2
Ubicación	Rodete	Tubo de aspiración
Tipo	Fluido	Fluido
Material	Agua a 298.15 K	Agua a 298.15 K
Movimiento del dominio	Rotatorio	Estacionario
Presión de referencia	0 atm	0 atm
Transferencia de calor	Energía total	Energía total
Modelo de turbulencia	k-ε	k-ε

Los parámetros de inicialización de dominio son los siguientes:

- El tipo de velocidad cartesiano, se establecieron los valores de los componentes cartesianos en automático, la escala de velocidad en 0  $m/s$ , mientras que la presión estática, la temperatura y la turbulencia también se establecieron en automático.

Las condiciones de frontera son las siguientes:

- Entrada: esta se encuentra en el dominio RODETE, se estableció el régimen de flujo subsónico, el flujo másico a la entrada es de 88, 884.3  $kg/s$  y se especificaron los parámetros de turbulencia en un 10%.

- Paredes: Los álabes, la corona y la banda se establecieron como paredes donde no existe deslizamiento, con textura pulida y movimiento rotatorio.
- Interface: al tratarse de dos dominios se estableció una interface tipo etapa (stage), siendo esta una interface fluido-fluido, con ángulos correspondientes a 360°.
- Salida: esta se encuentra en el dominio del tubo de aspiración, el tipo de condición de frontera es “salida” con un régimen de flujo subsónico y se trata de una salida de presión a 101,325 *Pa*.

### 3.6.2 Procesamiento

Los parámetros básicos del control de solución son los siguientes:

- Esquema de advección: Alta resolución.
- Números de turbulencia: primer orden
- Escala de tiempo: automática
- Control de convergencia: máximo 10,000 iteraciones.
- Criterio de convergencia: residual tipo RMS con objetivo de  $1 \times 10^{-4}$ .

Una vez iniciado el cálculo de la solución, CFX detendrá la solución cuando los residuales alcancen los valores especificados o después de las 10,000 iteraciones.

## CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 RESULTADOS EN EL RECIPIENTE DE MUESTREO

Una vez que CFX terminó de calcular la solución, se procedió a realizar un análisis de los resultados a través del módulo CFD-Post. El objetivo de realizar una simulación de flujo dentro del recipiente propuesto es justamente la evaluación y análisis del diseño, es decir verificar que este cumple con las condiciones establecidas en la norma.

#### 4.1.1 Líneas de corriente

La Figura 4.1 muestra las líneas de corriente correspondientes al flujo al interior del recipiente de muestreo. Es posible distinguir el comportamiento del flujo, el cual es el esperado de acuerdo con la norma (debe de existir un alto grado de estabilidad del flujo). También se puede observar como la velocidad del agua disminuye conforme el flujo avanza dentro del recipiente. Por último, se percibe una recirculación al final del recipiente

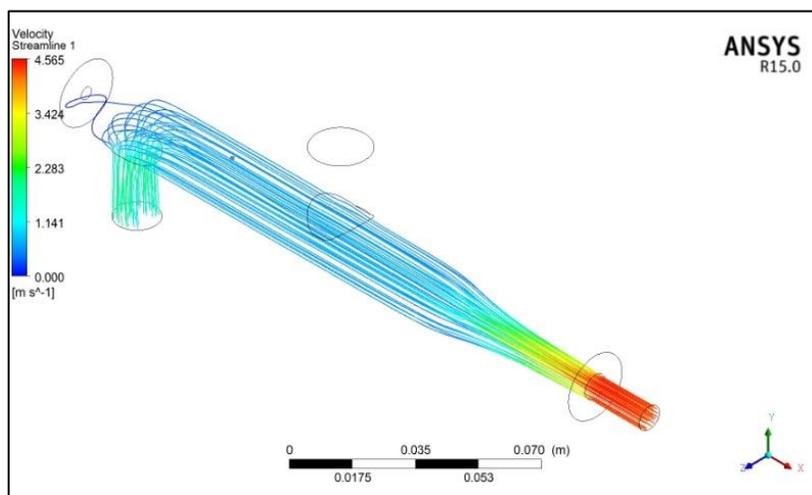


Figura 4.1 Líneas de corriente al interior del recipiente de medida.

#### 4.1.2 Contorno de presión

Es de suma importancia conocer la presión a la que estará sometido el recipiente de muestreo ya que ello dependerá la selección del material para su construcción en la siguiente etapa del diseño y a su vez verificar si el transductor de presión elegido será de utilidad para la medición de dicha magnitud física.

Como se muestra en la Figura 4.2 se existe un aumento de la presión ejercida en las paredes del recipiente conforme avanza el flujo al interior en especial en la zona donde se observa el contraflujo (Figura 4.1), para volver a disminuir a la salida del recipiente. La presión absoluta (presión estática más la presión atmosférica) máxima esperada en la pared interna sería de aproximadamente de 487,594 *Pa*.

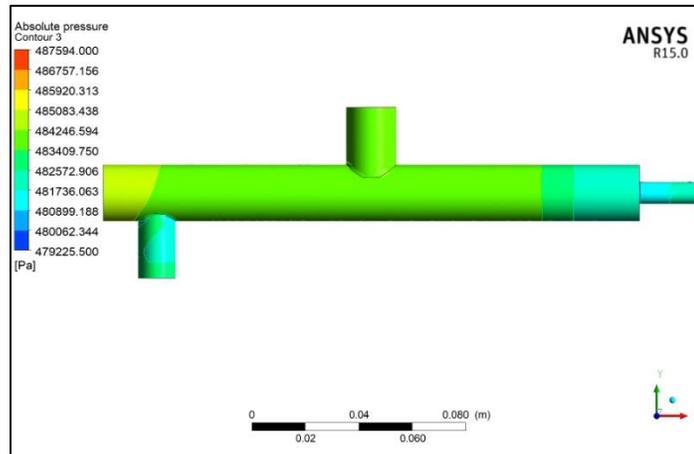


Figura 4.2 Presión absolutas en las paredes del recipiente.

Ahora bien, considerando la presión dinámica (10,390.80 *Pa*), la cual se define como:

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Donde:

$q$  = presión dinámica.

$\rho$  = densidad del fluido en  $kg/m^3$ .

$v$  = velocidad del fluido en  $m/s$ .

El valor máximo de la presión absoluta en la pared interna del recipiente sería entonces de 497,984.80  $Pa$ .

Para poder distinguir la presión absoluta justamente en el punto donde estará conectado el transductor de presión se creó un plano en esa área (Figura 4.3). La presión absoluta máxima medida en la conexión del instrumento sería aproximadamente de 494,591.8  $Pa$  (considerando la presión dinámica).

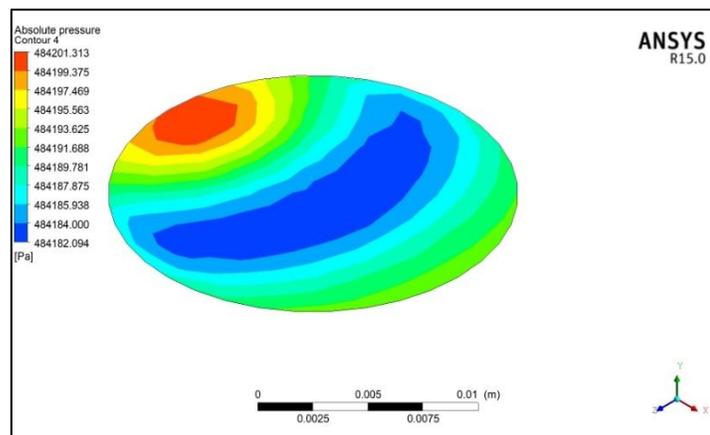


Figura 4.3 Valores de presión absoluta a salida de la toma del instrumento.

A partir de este análisis se valida la utilización del transductor de presión propuesto ya que las mediciones esperadas se encuentran dentro de los límites de medida de este.

### 4.1.3 Contorno de velocidad

Observando la Figura 4.4 es posible comprobar que el comportamiento del flujo corresponde a las especificaciones del diseño. La velocidad disminuye cuando se expande el diámetro interno del recipiente y esta concuerda con la velocidad calculada anteriormente (sección 3.4.2), además se cumple la condición de que esta debe ser reducida al interior del recipiente. También se puede visualizar que el flujo se desarrolla antes de pasar alrededor del RTD.

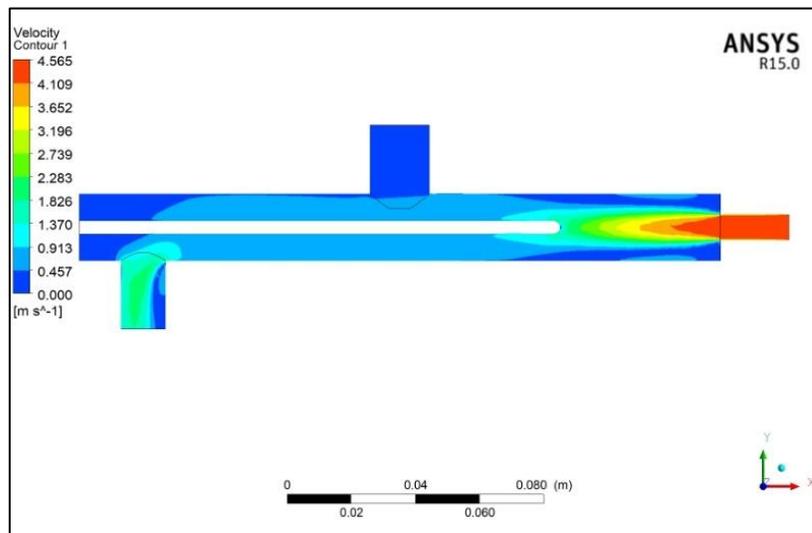


Figura 4.4 Velocidad al interior del recipiente.

### 4.1.4 Contorno de temperatura

Como muestra la Figura 4.5, la temperatura del agua al interior del recipiente es estable ya que en promedio se mantiene en los 298.152 K.

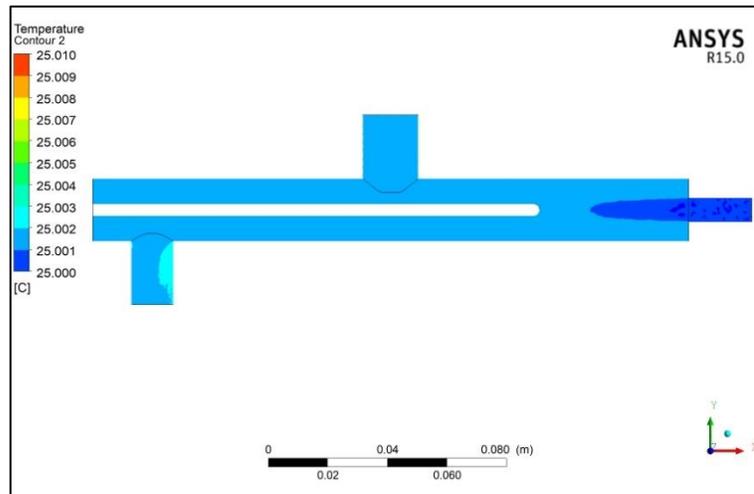


Figura 4.5 Temperatura al interior del recipiente.

De esta manera se constata que al utilizar el recipiente de muestreo diseñado es posible medir la temperatura del flujo principal ya que no existe una variación significativa que pueda afectar en la determinación de  $E_m$ .

## 4.2 RESULTADOS EN LA TURBINA

Una vez que CFX-Solver terminó de calcular la solución, se procedió a realizar un análisis de los resultados a través del módulo CFD-Post.

La importancia de realizar esta simulación en específico es poder realizar una exploración de la temperatura, presión y velocidad en la sección de medida para el lado de baja presión (en el tubo de aspiración).

### 4.2.1 Líneas de corriente

Nuevamente es posible visualizar el comportamiento del flujo esta vez en la sección de referencia de baja presión (Figura 4.6), la velocidad de este va disminuyendo conforme avanza en el tubo de aspiración. Además, es claramente identificable que el flujo tiende a ir hacia un lado en particular (ya

que existe una pared divisoria al interior del tubo); en las secciones siguientes se analizará como este comportamiento afecta la exploración y análisis de las variables de interés: temperatura, presión y velocidad.

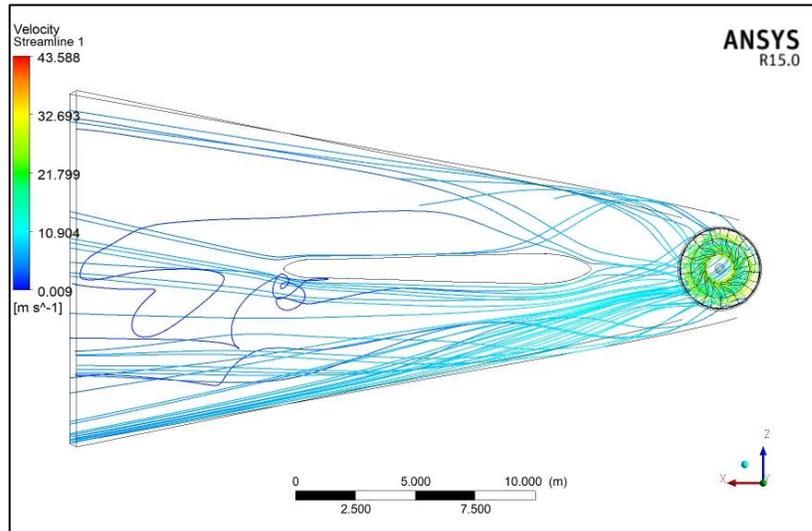


Figura 4.6 Líneas de corriente en el tubo de aspiración.

#### 4.2.2 Contorno de velocidad

Recordando que existe una pared divisoria al interior del tubo de aspiración, se obtienen dos secciones de medida. Como se explicó anteriormente, el flujo tiende a mantener la dirección con la que sale del rodete por lo que este se dirige la sección del lado izquierdo del tubo de aspiración.

En la Figura 4.7 se aprecia que la velocidad del flujo es mayor en la región cercana a la pared con respecto a la velocidad que hay en el centro (sección izquierda).

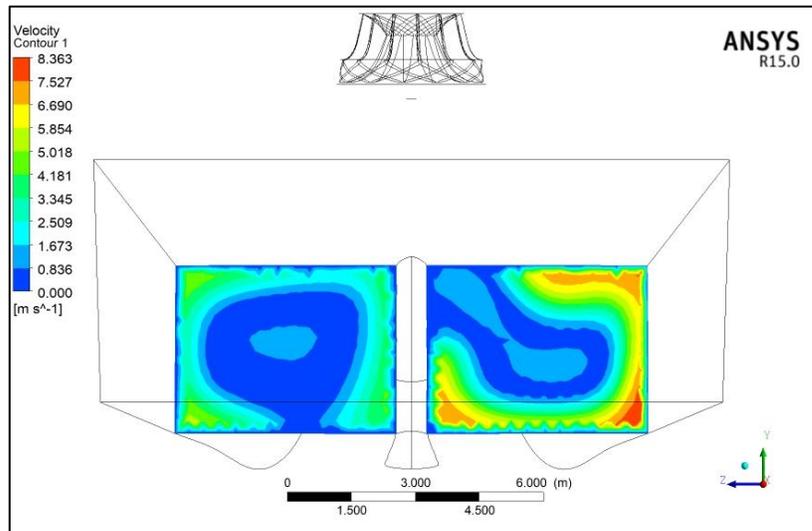


Figura 4.7 Velocidad del flujo en la sección de medida de baja presión.

Con base en lo anterior lo más recomendable sería establecer los puntos de muestreo al centro de ambas secciones.

#### 4.2.3 Contorno de temperatura

En la figura anterior es posible apreciar que la velocidad del flujo es mayor en la región cercana a las paredes, sin embargo, al comparar esta región contra la distribución de la temperatura en las secciones de medida se puede visualizar que justamente en esta región es donde existe una temperatura menor respecto a la temperatura en el resto de la sección (Figura 4.8). La diferencia de estas temperaturas está alrededor de 0.008 K.

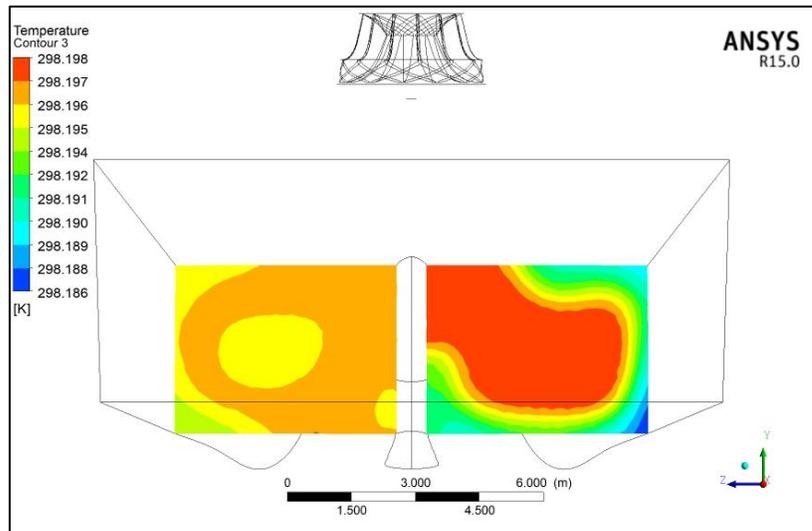


Figura 4.8 Temperatura en la sección de medida de baja presión.

#### 4.2.4 Contorno de presión

El contorno de presión (Figura 4.9) muestra que en una de las secciones la presión es estable, mientras que en la otra se presentan pequeñas variaciones en la región cercana a la pared, mientras que al centro esta permanece invariable.

La presión media en la sección de medida completa es alrededor de 98,832.6 Pa.

En la sección siguiente se realizará un análisis de las variables descritas anteriormente (temperatura, presión y velocidad).

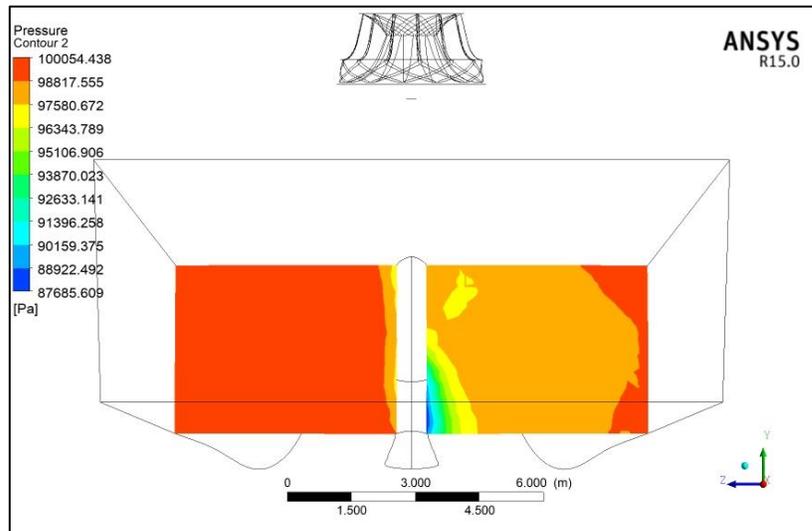


Figura 4.9 Presión en la sección de baja presión.

#### 4.2.5 Análisis de la temperatura, presión y velocidad en la sección de medida en el tubo de aspiración.

En la Figura 4.10 se muestran los puntos de muestreo correspondientes a los puntos donde se sugiere la colocación de los instrumentos en la sección de medida del lado de baja presión (sección 3.4.4), así mismo con ayuda de la simulación se obtuvo una aproximación de los valores de las variables deseadas (Tabla 4.1).

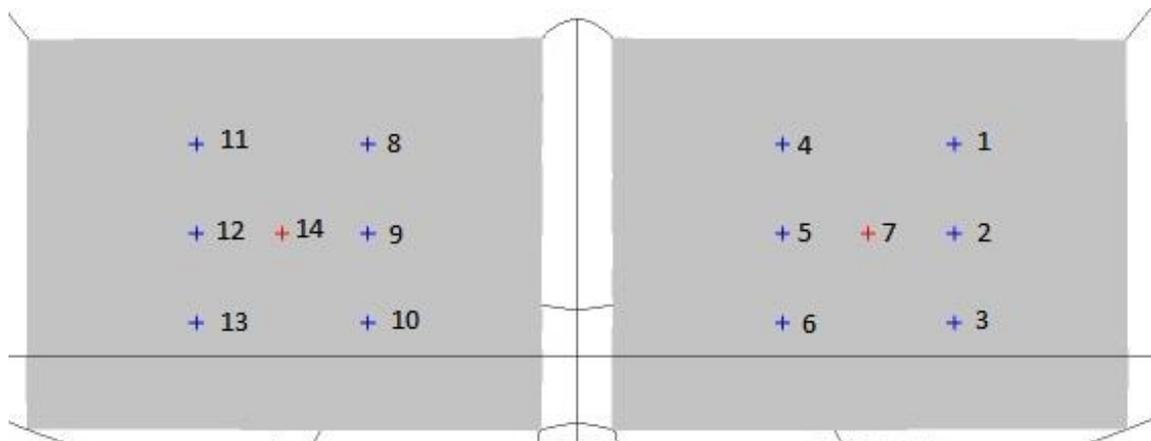


Figura 4.10 Puntos de muestreo en la sección de medida de baja presión.

Tabla 4.1 Valores de presión, velocidad y temperatura en los puntos de muestreo.

Punto	Temperatura (K)	Velocidad (m/s)	Presión (Pa)
1	298.197	3.23726	98,472.8
2	298.198	0.821291	98, 387
3	298.198	0.290513	98,495.6
4	298.198	0.71568	97,728.6
5	298.198	0.709437	98,054.5
6	298.198	0.49005	98,169.9
7	298.198	0.821013	97,963.9
8	298.196	0.421554	99,849.9
9	298.196	0.720131	99,817
10	298.196	0.06009.08	99,806.6
11	298.196	0.122117	99,844.6
12	298.196	0.815321	99,826.3
13	298.196	0.194973	99,813.8
14	298.196	0.892663	99,822.3
<b>Promedio</b>	298.197	0.742292	99,099.42

Con los valores obtenidos podemos constatar que la temperatura en esta sección es constante, la velocidad del flujo también es muy baja por lo que no hay influencia de esta sobre la temperatura.

#### 4.3 CÁLCULO DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA ESPECÍFICA DE LA TURBINA Y LA ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA EN EL RODETE

Empleando los datos obtenidos de las mediciones realizadas en la central hidroeléctrica de Temascal (Castro 2011), así como de la información

proporcionada por la simulación es posible calcular los valores de  $E$  y  $E_m$  respectivamente.

Los datos empleados para los cálculos son los siguientes:

$$\text{Gravedad local } (g) = 9.79 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Flujo volumétrico } (Q) = 89.67 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Densidad del agua } (\rho) = 997.2 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Altura neta } (H) = 43.64 \text{ m}$$

Las variables de interés con las que se realiza el cálculo de  $E_m$  son la temperatura, la presión, la velocidad y el nivel de referencia dónde se coloca la instrumentación en la sección de alta presión y baja presión respectivamente.

En el recipiente de muestreo que se coloca en la sección 11 (alta presión), los valores de estas variables de acuerdo con las simulaciones son los siguientes:

$$\theta_{11} = 298.152 \text{ K}$$

$$v_{11} = 4.565 \text{ m/s}$$

$$p_{abs11} = 497984.8 \text{ Pa}$$

$$z_{11} = 11.115 \text{ m (sobre el nivel del mar).}$$

Los valores medios mostrados en la Tabla 4.1 de la temperatura velocidad y presión, correspondientes a los valores para la sección de medida en el lado de baja presión se muestran a continuación:

$$\theta_{21} = 298.197 \text{ K}$$

$$v_{21} = 0.742 \text{ m/s}$$

$$p_{abs21} = 99099.42 \text{ Pa}$$

$z_{21} = 9 \text{ m}$  (sobre el nivel del mar)

Los valores de  $\bar{c}_p$  y  $\bar{a}$  se obtuvieron a partir de las Tablas E.5 y E.6 del Anexo E de la norma IEC 60041:

$$c_p = 4182 \text{ J/kgK}$$

$$\bar{a} = 0.000926332 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Es posible calcular  $P_m$  a partir de la relación:

$$P_m = E_m(\rho Q) = 19066888.20 \text{ W} \approx 19.07 \text{ MW}$$

Ahora bien, calculando  $E$  a partir de la caída neta y la gravedad local se tiene que:

$$E = gH = 427.637088 \text{ J/kg}$$

Calculando  $E_m$ :

$$E_m = \bar{a}(p_{abs11} - p_{abs21}) + \bar{c}_p(\theta_{11} - \theta_{21}) + \frac{v_{11}^2 - v_{21}^2}{2} + g(z_{11} - z_{21}) + \delta E_m$$

$$E_m = 213.23 \text{ J/kg}$$

Una vez se obtienen los valores de  $E$  y  $E_m$  se procede a calcular de la eficiencia de la máquina

$$\eta = \frac{E_m}{E} = \frac{213.23 \text{ J/kg}}{427.637088 \text{ J/kg}} = 0.4986$$

Por lo tanto, la eficiencia de la turbina sería del 49.86%.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se determinaron las condiciones de operación a las cuales el sistema propuesto podría aplicar.
- Se seleccionó la instrumentación a utilizar para la obtención de las variables de interés para la determinación de la eficiencia mediante el método termodinámico.
- Se sugiere el uso del sistema de adquisición de datos US-B6343 ya que es un equipo que con el que se cuenta en el CIICAp y tiene entradas y salidas (analógicas y digitales) suficientes para la instrumentación sugerida.
- Se diseñaron los dispositivos de toma de muestras que se instalarán en la tubería de presión y el tubo de aspiración.
- Se analizó y evaluó el sistema propuesto calculando la eficiencia de la unidades mediante la obtención de  $E$  y  $Em$ .

A través de este desarrollo teórico es posible determinar, la aplicación de este método en centrales con caídas menores a 100  $m$ ; lo anterior debido a que la central hidroeléctrica de Temascal, ubicada en el municipio de San Miguel Soyaltepec, Oaxaca cuenta con una caída neta de diseño de 56.4  $m$

Ya que a través de lo comprobado con base en las diferentes simulaciones las medidas para el diseño del recipiente propuestas en forma teórica son correctas; puesto que se logró una disminución de la velocidad del flujo, así mismo se observa que el flujo del agua se mantiene estable y con una excelente mezcla antes de que el RTD tipo Pt-100 mida la temperatura.

A través de la simulación del flujo en el recipiente se logró comprobar que la temperatura medida tanto en el tubo de presión como en el recipiente es la misma en ambos.

En relación con la simulación del tubo de aspiración se comprobó que la velocidad se mantiene menor a  $2.5 \text{ m/s}$  en el área en la que se propuso colocar los puntos de muestreo (cercano al centro de dicho tubo) por lo cual no se vería afectada la medición de la variable mencionada anteriormente.

Al realizar la simulación de flujo en la turbina, se observó un fenómeno de contraflujo en el tubo de aspiración y a pesar de que se presenta; no se ve afectada la sección de medida propuesta.

También, se confirma la importancia de una medición de la temperatura exacta, ya que de existir una diferencia considerable de temperatura, esta se ve reflejada directamente en la eficiencia de la máquina.

Finalmente es posible constatar que pueden existir las condiciones idóneas para la aplicación de este método de medición de rendimiento en centrales hidroeléctricas con una caída menor al establecido en la norma IEC 60041.

### ***Recomendaciones***

Es necesario realizar el cálculo de rendimiento con las variables obtenidas en la simulación contrastándolo con la información obtenida en campo

En base a los resultados obtenidos de la simulación y que han sido mostrados en este trabajo de investigación es necesario dar continuidad en la creación de un prototipo para verificar en campo la aplicación de la puesta en marcha de este método termodinámico para medición de rendimiento.

## REFERENCIAS

IEC (Ed.), IEC 60041 - Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, 3<sup>rd</sup> ed., Ginebra, Suiza.

Feng X., Hequet T., Weirong H., Muciaccia F.F., Dossi A., "Efficiency testing in Tai An (Shandong China) PSPP reversible units by means of thermodynamic method", The 7th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Septiembre 2008, Milan, Italia.

Huulas H., Nilsen E. Vinnog L. "Thermodynamic Efficiency Measurements of Pelton Turbines. Experiencie from Investigation of Energy/Temperature Distribution in the discharge Canal Measuring Section", The 7th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Septiembre 2008, Milan, Italia.

Kahraman G., Yücel H. L., Öztop H., "Evaluation of energy efficiency using thermodynamics analysis in a hydropower plant: A case study", Renewable Energy 34 (2009) 1458 – 1465.

Ramdal J., Lundekvam A., Bokko E., Dahlhaug O. G., Nielsen T. K., "Uncertainty and performance of a low head thermodynamic measurement", The 8th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Octubre 2010, Roorkee, India.

Hulaas H., Vinnogg L., "IEC 60041 1991 Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-

turbines. Clause 14 thermodynamic method for measuring efficiency comments”, The 8th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Octubre 2010, Roorkee, India.

Abgottspon A., Briggeler M., Staubli T., “Corrective terms of thermodynamic efficiency measurements”, The 8th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Octubre 2010, Roorkee, India.

Patil S., Verma H.K., Kumar A., “Efficiency measurement of hydro machine by thermodynamic method”, The 8th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Octubre 2010, Roorkee, India.

Muciaccia F.F., Grego G., Ciolli P., Dossi A., “Water to wire efficiency measurements in small hydroelectric units by means of thermodynamic and thermo-calorimetric method”, The 8th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Octubre 2010, Roorkee, India.

Mangla M., Khodre N., “Measurement of turbine efficiency by thermodynamic method for field acceptance test of hydro turbine and comparison with model test result”, The 8th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Octubre 2010, Roorkee, India.

Rau T., Eissner M., “Comparison of discharge measurements – thermodynamic to US clamp – on, stationary US and needle opening curve”, The 8th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of

International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Octubre 2010, Roorkee, India.

Coté E., Proulc G., “Experiments with the thermodynamic method”, The 9th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Junio 2012, Trondheim, Noruega.

Brekke H., “A proposal for improving the thermodynamic method”, The 9th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Junio 2012, Trondheim, Noruega.

Hulaas H., Parr L., Nielsen E., “Comparison between pressure-time and thermodynamic method on a 52 m net head plant”, The 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Septiembre 2014, Itajuba, Brasil.

Lanzersdorfer J., Götsch L., Analytical Solutions using the thermodynamic efficiency method for absolute flow measurement. Flow Measurement and Instrumentation 44 (2015) 89 – 96.

Tantaworranart M., “An experience in thermodynamic test of low head turbine in thailand the case of Mae Ngat hydro power plant”, The 11th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Agosto 2016, Linz, Austria.

Rakusch C., Senn F., Guggenberger M., Jaberg H., “A new measurement and data acquisition system for field acceptance tests using the thermodynamic method”, The 11th International Conference on Hydraulic

Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Agosto 2016, Linz, Austria.

Alič G., Dolenc D., "Application of thermodynamic efficiency measurement using temperatura sensors installed into the wáter passage system", The 11th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Agosto 2016, Linz, Austria.

Sevcik P., "Turbine efficiency measured by thermodynamic method against using ultrasonic flowmeter", The 11th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements of International Group for Hydraulic Efficiency Measurements, Agosto 2016, Linz, Austria.

Rolle, Kurt C., Temodinámica, sexta edición, PEARSON EDUCACIÓN, México, 2006.

Mujal Rosas, Ramón M., Tecnología Eléctrica, segunda edición, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 2003.

Sanz Osorio, José Francisco (coordinador), Energía hidroeléctrica, Prensas universitarias de Zaragoza, Zaragoza, 2008.

Senner, Adolf, Principios de electrotecnia, Reverté, Barcelona, España, 1994.

Artículo 27, Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, México, 5 de febrero de 1917.

CONAGUA, Estadísticas del Agua en México, Comisión Nacional del agua, México, 2015.

Budynas, Richard G., Nisbett J. Keith, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 8ª ed., McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, México, 2008.

Dym, Clive I., Little Patrick, El proceso de diseño de ingeniería, Limusa Wiley, México, 2002.