



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**ACTUALIZACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN DE LA PLANTA DE
VAPOR DEL LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS**

POR

Martín Alonso Jara Contreras

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Profesor Óscar Francisco Farías Fuentes

Marzo 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Martín Alonso Jara Contreras

Resumen

La Planta de Vapor del Laboratorio de Termofluidos de la Universidad ha estado en operación por más de 50 años, siendo fundamental para la formación profesional de los estudiantes, ya que cuenta con los componentes principales de una central termoeléctrica. Sin embargo, no ha experimentado cambios significativos en los instrumentos de medición, por lo que se requiere modernizar dichos equipos e implementar un sistema local que registre los datos de manera continua. El propósito del presente trabajo consiste proponer mejoras en la instrumentación de la Planta de Vapor para la enseñanza práctica de las asignaturas relacionadas con el área de Termofluidos. Conforme a esto, se lleva a cabo un diagnóstico de la central basado en mediciones históricas y en los balances de masa y energía del ciclo, los cuales fueron resueltos mediante un programa EES. Este análisis resalta las variables críticas y los equipos con errores significativos, identificando que el circuito de generación presenta los mayores márgenes de error. La implementación incluye la instalación de 10 transmisores de presión, 13 transmisores de temperatura, 4 flujómetros, 1 analizador de corriente y un sistema de monitoreo de variables con pantalla táctil, entre otros. Posteriormente, se analiza la percepción de los estudiantes mediante una encuesta que muestra la visualización de las variables del sistema local, obteniendo resultados positivos en cuanto a la claridad y facilidad de interpretación de datos. En términos de mejora de precisión, se logra reducir el error del rendimiento del ciclo a un 10% de su valor original, y se alcanza una disminución del 95% en el error del rendimiento de la turbina. Finalmente, se diseñan protocolos de ensayo para las asignaturas del área de Termofluidos, esquematizando las experiencias de laboratorio de acuerdo con la taxonomía de Bloom y vinculando los resultados de aprendizaje con los indicadores clave de desempeño establecidos para la carrera de Ingeniería Civil Mecánica.

Palabras clave: Termofluidos, actualización, instrumentación, mediciones, error.

Abstract

The Steam Plant of the University's Thermofluids Laboratory has been in operation for more than 50 years, being fundamental for the professional training of students, since it has the main components of a thermoelectric power plant. However, it has not undergone significant changes in the measuring instruments, so it is required to modernize such equipment and implement a local system to record data continuously. The purpose of this work is to propose improvements in the instrumentation of the Steam Plant for the practical teaching of subjects related to the area of Thermofluids. Accordingly, a diagnosis of the plant is carried out based on historical measurements and on the mass and energy balances of the cycle, which were solved by means of an EES program. This analysis highlights the critical variables and equipment with significant errors, identifying that the generation circuit has the highest error margins. The implementation includes the installation of 10 pressure transmitters, 13 temperature transmitters, 4 flowmeters, 1 current analyzer and a variable monitoring system with touch screen, among others. Subsequently, the students' perception is analyzed by means of a survey showing the visualization of the local system variables, obtaining positive results in terms of clarity and ease of data interpretation. In terms of accuracy improvement, the cycle performance error is reduced to 10% of its original value, and a 95% decrease in the turbine performance error is achieved. Finally, test protocols are designed for the subjects of the Thermofluids area, outlining the laboratory experiences according to Bloom's taxonomy and linking the learning results with the key performance indicators established for the Mechanical Civil Engineering.

Keywords: Thermofluids, updating, instrumentation, measurements, error.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	iii
Lista de Tablas	vi
Lista de Figuras	vii
Glosario	ix
Subíndices	x
Letras Griegas	x
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Contextualización	1
1.2 Planteamiento del Problema	3
1.3 Objetivo General.....	4
1.4 Objetivos Específicos	4
1.5 Hipótesis	4
1.6 Metodología de Trabajo.....	4
2 Capítulo 2: Análisis de Caso Actual	6
2.1 Caracterización de Planta a Vapor.....	6
2.1.1 Diagrama General	6
2.1.2 Equipos	7
2.1.3 Instrumentación.....	13
2.2 Balances de Masa y Energía.....	15
2.2.1 Circuito de Humos	15
2.2.2 Circuito Hidráulico	17
2.2.3 Circuito de Generación	20
2.2.4 Circuito de Refrigeración.....	21
2.2.5 Rendimiento Planta a Vapor	22
2.3 Análisis de Mediciones Históricas	23
2.3.1 Recopilación de Información	23
2.3.2 Análisis de Resultados	24
2.4 Discusión de Resultados	25
3 Capítulo 3: Alternativas de Actualización	27
3.1 Propuestas de Instrumentación	27
3.1.1 Análisis de Alternativas	27
3.1.2 Criterios de Evaluación.....	28

3.2 Selección de Instrumentación	29
3.2.1 Evaluación Técnica	29
3.2.2 Evaluación Económica.....	31
3.3 Discusión de Resultados	32
4 Capítulo 4: Implementación	34
4.1 Instrumentación Implementada	34
4.2 Análisis de Error	36
4.2.1 Mediciones Utilizadas.....	36
4.2.2 Recopilación Resultados	37
4.2.3 Análisis de Resultados	38
4.3 Encuesta de Satisfacción	39
4.3.1 Criterios de Evaluación.....	39
4.3.2 Recopilación de Resultados	40
4.4 Discusión de Resultados	42
5 Capítulo 5: Protocolos de Ensayo	43
5.1 Recopilación de Experiencias.....	43
5.1.1 Asignatura de Introducción a la Ingeniería Mecánica	43
5.1.2 Asignatura de Termodinámica	44
5.1.3 Asignatura de Termodinámica Aplicada	45
5.1.4 Asignatura de Centrales de Energía	47
5.2 Planificación de Ensayo para Diferentes Niveles en la Carrera	51
5.2.1 Resultados de Aprendizaje e Indicadores Claves de Desempeño.....	51
5.2.2 Planificación para Nivel Básico.....	53
5.2.3 Planificación para Nivel Intermedio	55
5.2.4 Planificación para Nivel Avanzado	56
5.3 Recomendaciones para la Planificación de Experiencias en el Plan de Estudio	57
5.3.1 Asignatura de Termodinámica	57
5.3.2 Asignatura de Termodinámica Aplicada	57
5.3.3 Asignatura de Centrales de Energía	57
6 Capítulo 6: Conclusiones	58
Referencias	59
Anexo A: Carta Gantt.....	60
Anexo B: Características Nominales de los Equipos	61

Anexo C: Programa EES – Balances de masa y energía.....	64
Anexo D: Presupuestos de las Empresas.....	68
Anexo E: Respuestas Encuesta de Satisfacción	74
Anexo F: Competencias y KPIs de la Carrera Ingeniería Civil Mecánica.....	78

Lista de Tablas

Tabla 1: Numeración de Componentes de Planta de Vapor	7
Tabla 2: Instrumentos de Medición de Presión	13
Tabla 3: Instrumentos de Medición de Temperatura	14
Tabla 4: Instrumentos de Medición de Flujo.....	14
Tabla 5: Instrumentos de Medición para Estación de Generación	14
Tabla 6: Mediciones Históricas	23
Tabla 7: Resumen de Resultados	24
Tabla 8: Ponderación de Criterios de Evaluación.....	29
Tabla 9: Matriz de Priorización.....	30
Tabla 10: Presupuesto Empresa A	31
Tabla 11: Presupuesto Empresa B.....	31
Tabla 12: Presupuesto Propuesta Propia.....	32
Tabla 13: Glosario Diagrama de Flujo.....	35
Tabla 14: Características Nominales de la Instrumentación	35
Tabla 15: Mediciones Utilizadas	36
Tabla 16: Resultados	37
Tabla 17: Años de Ingreso	40
Tabla 18: Resultados de Aprendizaje y Competencias.....	51
Tabla 19: Características Nominales de la Caldera [14]	61
Tabla 20: Características Nominales del Quemador	61
Tabla 21: Características Nominales de la Bomba de Alimentación [9].....	61
Tabla 22: Características Nominales del Sobrecalentador [9].....	62
Tabla 23: Características Nominales del Quemador Diésel	62
Tabla 24: Características Nominales de la Turbina [9].....	62
Tabla 25: Características Nominales Generador [9]	62
Tabla 26: Características Nominales del Condensador [9]	63
Tabla 27: Características Nominales de la Bomba del líquido condensado	63
Tabla 28: Características Nominales de la Torre de Enfriamiento [9]	63
Tabla 29: Características Nominales Bomba de Enfriamiento.....	63
Tabla 30: Características Nominales del Ablandador [9]	63
Tabla 31: Competencias de la Carrera	78
Tabla 32: Indicadores Clave de Desempeño de la Carrera.....	79

Lista de Figuras

Figura 1.1: Composición de emisiones totales al aire de fuentes puntuales por rubro [3]	1
Figura 2.1: Diagrama Planta de Vapor del Laboratorio de Termofluidos [10]	6
Figura 2.2: Ablandador [11]	8
Figura 2.3: Desaireador y Estanque de Acumulación [11]	8
Figura 2.4: Caldera	8
Figura 2.5: Quemador a Gas Natural de la Caldera	8
Figura 2.6: Sobrecalentador [11]	9
Figura 2.7: Panel Eléctrico y de Temperaturas [11]	9
Figura 2.8: Turbina [11]	10
Figura 2.9: Reductor de Velocidad [11]	10
Figura 2.10: Generador Eléctrico [11]	10
Figura 2.11: Panel Eléctrico Indicador de Corriente y Voltaje [11]	11
Figura 2.12: Panel Eléctrico de Temperaturas [11]	11
Figura 2.13: Estación de Generación, Parte Posterior [11]	11
Figura 2.14: Condensador, Vista Frontal [11]	12
Figura 2.15: Condensador, Vista Posterior [11]	12
Figura 2.16: Torre de Enfriamiento [11]	12
Figura 2.17: Zona de Agua de Enfriamiento [11]	12
Figura 2.18: Volumen de Control Caldera	15
Figura 2.19: Volumen de Control Sobrecalentador	15
Figura 2.20: Volumen de Control Desaireador	17
Figura 2.21: Volumen de Control de la Turbina a Vapor	20
Figura 2.22: Volumen de Control del Condensador	21
Figura 4.1: Diagrama de Flujo de la Implementación [Empresa 1]	34
Figura 4.2: Gráfico Comparativo de Errores Año 2018	38
Figura 4.3: Resultados Encuesta, Pregunta 3	40
Figura 5.1: Niveles de la Taxonomía de Bloom	43
Figura 5.2: Protocolo de Ensayo Introducción a la Ing. Mecánica	43
Figura 5.3: Protocolo de Ensayo Termodinámica, Lab. 1	44
Figura 5.4: Protocolo de Ensayo Termo. Aplicada, Lab. 2	45
Figura 5.5: Protocolo de Ensayo Termo. Aplicada, Lab. 4	46
Figura 5.6: Protocolo de Ensayo Centrales de Energía, Lab. 1	48
Figura 5.7: Protocolo de Ensayo Centrales de Energía, Lab. 2	49
Figura 5.8: Protocolo de Ensayo Centrales de Energía, Experiencia 1	50
Figura 5.9: Protocolo de Ensayo Centrales de Energía, Experiencia 2	50
Figura 5.10: Mapa Conceptual de asignaturas relacionadas al área de Termofluidos	53
Figura 5.11: Esquema que relaciona experiencias de laboratorio con RA (T1)	54
Figura 5.12: Esquema que relaciona experiencias de laboratorio con RA (T2)	55
Figura 5.13: Esquema que relaciona experiencias de laboratorio con RA (CE)	56
Figura 6.1: Carta Gantt del Proyecto	60

Figura 6.2: Incertidumbres de Variables Medidas	67
Figura 6.3: Presupuesto Empresa A - Parte 1	68
Figura 6.4: Presupuesto Empresa A - Parte 2	68
Figura 6.5: Presupuesto de Empresa B	69
Figura 6.6: Presupuesto de implementación de Empresa B	70
Figura 6.7: Flujómetro másico para gas natural.....	70
Figura 6.8: Termocupla para altas temperaturas	71
Figura 6.9: Analizador de gases de combustión	71
Figura 6.10: Transmisor de presión	72
Figura 6.11: Psicómetro	72
Figura 6.12: Presupuesto de sistema de trampas de vapor	73
Figura 6.13: Aislante térmico	73
Figura 6.14: Respuesta Encuesta, Pregunta 2	74
Figura 6.15: Respuesta Encuesta, Pregunta 4	74
Figura 6.16: Respuesta Encuesta, Pregunta 5	74
Figura 6.17: Respuesta Encuesta, Pregunta 6	75
Figura 6.18: Respuesta Encuesta, Pregunta 7	75
Figura 6.19: Respuesta Encuesta, Pregunta 8	75
Figura 6.20: Respuesta Encuesta, Pregunta 9	76
Figura 6.21: Respuesta Encuesta, Pregunta 10	76
Figura 6.22: Respuesta Encuesta, Pregunta 11	76
Figura 6.23: Respuesta Encuesta, Pregunta 12	77

Glosario

Abs	: Absoluta
ABET	: Accreditation Board for Engineering and Technology
CLP	: Peso Chileno
DS	: Decreto Supremo
F	: Fuerza, N
FENU	: Fondo Especial de las Naciones Unidas
GN	: Gas Natural
h	: Entalpía, kJ/mol
I	: Intensidad, A
KPI	: Indicadores Clave de Desempeño
\dot{m}	: Flujo Másico, kg/h
M.E-A	: Motor Eléctrico de Bomba A
M.E-B	: Motor Eléctrico de Bomba B
M.E-C	: Motor Eléctrico de Bomba C
M.E-D	: Motor Eléctrico de Bomba D
M.E-E	: Motor Eléctrico de Bomba E
N	: Potencia, kW
N.A.	: No Aplica
OE	: Objetivo Específico
P	: Presión, kPa
PCI	: Poder Calorífico Inferior, kJ/kg
PV	: Planta a Vapor
\dot{Q}	: Flujo de Calor Transferido, kW
R	: Longitud Reductor, m
RA	: Resultado de Aprendizaje
s	: Entropía, J/K
t	: Tiempo, s
T	: Temperatura, °C
TE	: Torre de Enfriamiento
UNESCO	: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
V	: Voltaje, V
V	: Volumen, m ³
\dot{V}	: Flujo Volumétrico, m ³ /s
w	: Humedad Relativa, %
\dot{W}	: Trabajo, kJ

Subíndices

<i>a</i>	:	Aire
atm	:	Atmosférica
bba	:	Bomba
cald	:	Caldera
cond	:	Condensador
D	:	Diésel
e	:	Eléctrica
g	:	Generador
GN	:	Gas Natural
m	:	Motor
rep	:	Reposición
s	:	Isentrópico
sob	:	Sobrecalentador
turb	:	Turbina
<i>v</i>	:	Vapor
<i>w</i>	:	Agua

Letras Griegas

ρ	:	Densidad, kg/m ³
Δ	:	Diferencia
<i>v</i>	:	Volumen específico, m ³ /kg
η	:	Rendimiento
ω	:	Velocidad Angular, rad/s

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contextualización

La electricidad es una de las fuentes de energías más utilizadas actualmente, la cual es producida en Centrales o Plantas de generación. En Chile, un 38% de la capacidad total instalada (33.218 MW) es producida por centrales térmicas [1] a partir de combustibles fósiles, principalmente carbón, en el caso de centrales basadas en ciclo Rankine. En una central termoeléctrica, el combustible se quema en la caldera, transfiriendo calor al agua y llevándola al estado de vapor sobrecalentado a una presión dada. El vapor acciona una turbina, generando energía mecánica y transformándola mediante un generador a energía eléctrica. El vapor que sale de la turbina se enfría en un condensador convirtiéndolo en agua, la cual es regresada al sistema de alimentación de la caldera, empezando nuevamente el ciclo de producción de vapor [2].

Uno de los principales factores que afectan el medio ambiente debido a la producción de energía mediante termoeléctricas son las emisiones de residuos a la atmósfera, entre las cuales se encuentran las emisiones de dióxido de azufre (SO_2), dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x). En la siguiente Figura se muestran las emisiones totales al aire por cada rubro para Chile en el año 2020.

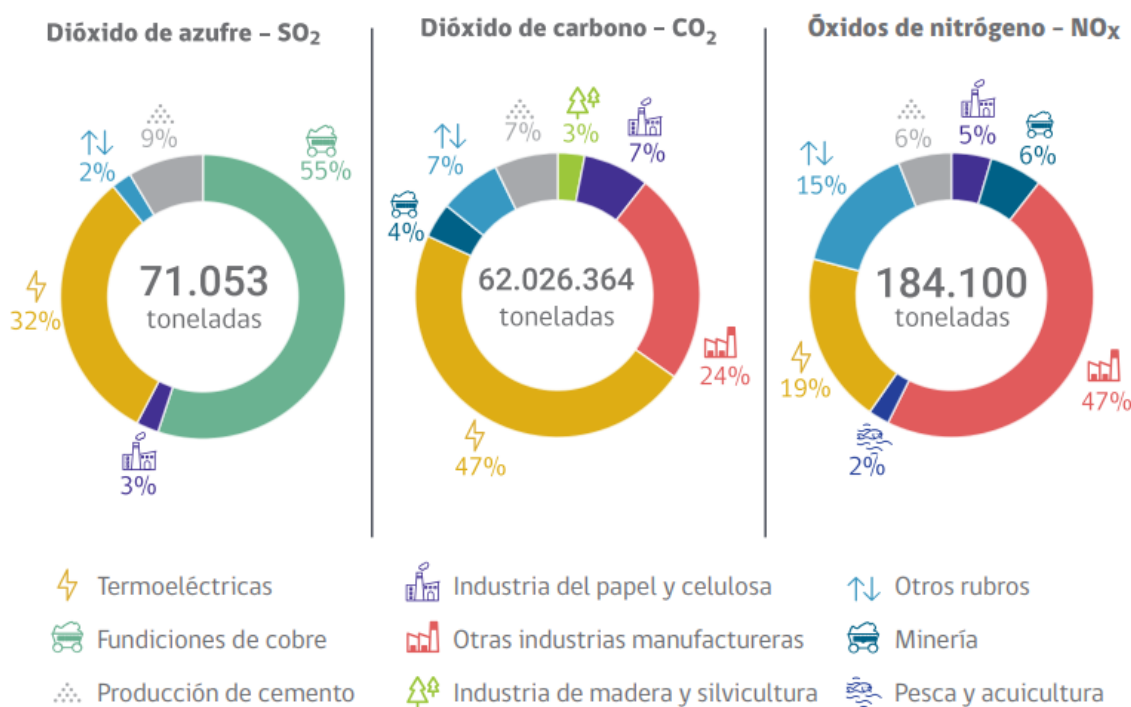


Figura 1.1: Composición de emisiones totales al aire de fuentes puntuales por rubro [3]

Se observa que las termoeléctricas son las principales emisoras de CO_2 , alcanzando el 47% del total emitido, debido a esto las centrales térmicas utilizan chimeneas de gran altura con el fin de dispersar estas partículas y disminuir su influencia negativa en el aire [4].

A pesar de que las termoeléctricas son las principales emisoras de CO₂, estas constituyen el 38% de la generación total de electricidad. Por lo que existen diversas centrales a lo largo del país, lo que genera una gran cantidad de oportunidades de empleo hacia los profesionales del ámbito de ingeniería.

Debido a esto y con el fin de desarrollar y mejorar la enseñanza impartida por la Facultad de Ingeniería, además de estimular y promover la investigación científica para el desarrollo profesional de docentes y alumnos de la Facultad, la Universidad de Concepción a principios del año 1960 estudió la posibilidad de presentar un proyecto al Fondo Especial de las Naciones Unidas (FENU), el cual consistía en la implementación de la primera Planta a Vapor con fines académicos del país [7]. La gran importancia de este Laboratorio radica en la posibilidad de que los estudiantes puedan mejorar el aprendizaje de los cursos impartidos por la Facultad, desarrollando la habilidad de toma de decisiones, adquiriendo responsabilidades en trabajos grupales y enfatizando en el análisis y discusión de resultados [8].

Con estos fines, en el año 1968 se desarrolló el proyecto de instalación de equipos del Laboratorio de Termofluidos, incluyendo la Planta de Vapor, los cuales fueron adquiridos e instalados a través del convenio FENU-UNESCO-Universidad de Concepción [5].

Desde la instalación de la Planta Térmica son bastantes los cambios que se le han realizado. Dentro los que se tiene registro, se encuentran los cambios de caldera en octubre de 1994 [7] y en 1998 [8], el cambio de la bomba de extracción de condensado en 1984 y el cambio del eyector por bomba de anillo líquido en diciembre de 1990 [7].

Actualmente la central térmica cuenta con un ablandador, un desaireador o precalentador de agua, una caldera con quemador a gas natural, un sobrecalentador con quemador diésel, una turbina con cámara de toberas, un reductor de velocidad, un generador de energía eléctrica, un condensador, una torre de enfriamiento y 5 bombas de circulación, de las cuales se encuentran 4 operativas, encargadas de alimentar la caldera, extracción de condensado, extracción de incondensables y circulación de refrigerante.

Si bien la central cuenta con todos los equipos necesarios para la producción de energía eléctrica, estos tienen capacidades de operación distintas entre sí, implicando así un bajo rendimiento del ciclo [9].

1.2 Planteamiento del Problema

Dentro del Laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción se encuentra una Central o Planta de Vapor de uso experimental para los alumnos de la institución, la cual utiliza el Ciclo Rankine como ciclo de potencia y es alimentada por gas natural (para la caldera) y diésel (para el sobrecalentador). Dicha Central es única en el país, ya que su uso es destinado sólo para los estudiantes de la universidad con el fin de mejorar los métodos de aprendizaje, incorporando desafíos y mediciones experimentales, contribuyendo en el proceso de su carrera profesional.

En los últimos 10 años la Planta no ha tenido cambios significativos, por lo que se deben proponer mejoras en su instrumentación, con el motivo de reducir los errores de medición y a su vez mejorar la experiencia del alumnado. Paralelamente se desea cumplir con nuevas normativas de seguridad como el decreto 10 (DS 10), además de optar por nuevos métodos que permitan aumentar el desempeño y disminuir los gases contaminantes emanados. Las mejoras deberán ser evaluadas principalmente por una encuesta hacia los estudiantes que cursan asignaturas del área de termofluidos y mediante una comparación en la brecha de error de los instrumentos de medición.

Al actualizar los instrumentos de medición se reducirán los errores de medición, asimismo, al implementar un sistema de monitoreo se obtendrá un seguimiento temporal de las variables operacionales, lo cual contribuirá al aumento de precisión y confiabilidad de operación, lo que mejorará calidad de aprendizaje de los alumnos. Además, se requiere la elaboración de protocolos de ensayos para el alumnado, el cual deberá ser organizado de manera didáctica, fomentando el proceso de enseñanza-aprendizaje de una manera más tecnológica.

Cabe destacar que ya se tienen dos mejoras a realizar, específicamente en el sobrecalentador, en donde se reemplazará el actual sistema de alimentación diésel (quemador diésel) por un quemador alimentado por gas natural, utilizando la misma red que la caldera. La segunda mejora consiste en el reemplazo del sistema de control de la temperatura de sobrecalentamiento, ya que se encuentra obsoleto y en malas condiciones.

1.3 Objetivo General

Proponer mejoras en la instrumentación de la Planta de Vapor para la enseñanza práctica de asignaturas del área de Termofluidos.

1.4 Objetivos Específicos

1. Realizar un diagnóstico de la operación actual de la Planta de Vapor a fin de establecer las variables relevantes y las brechas en términos de mediciones.
2. Seleccionar e implementar mejoras en la instrumentación de la Planta de Vapor para las variables que intervienen en los balances de materia y energía.
3. Analizar los resultados de la implementación en base a la percepción del estudiantado y la brecha de error entre la instrumentación antigua y nueva.
4. Establecer protocolos de ensayo para las asignaturas del área de Termofluidos en base de los resultados de aprendizaje establecidos.

1.5 Hipótesis

La actualización de la instrumentación de la Central de Vapor del Laboratorio de Termofluidos contribuirá a disminuir el margen de error en términos de mediciones, lo que permitirá obtener resultados más precisos. Asimismo, mediante la incorporación de un registro continuo de variables, se logrará un mayor control sobre los efectos transitorios de la Planta, además de reducir los tiempos de medición manual, con el propósito de alcanzar resultados óptimos para los estudiantes.

1.6 Metodología de Trabajo

El trabajo consiste en evaluar una propuesta de mejoras para la instrumentación de la Central de Vapor del Laboratorio de Termofluidos e implementarla en dicho lugar. En primera instancia, se deberá realizar un diagnóstico de la operación actual de la Planta, en donde se analizarán las variables relevantes a mejorar y se determinará el error asociado a las mediciones. Conforme a esto, se seleccionará e implementará la instrumentación de la Central. Posteriormente, se llevará a cabo un análisis comparativo de las brechas de error entre los instrumentos de medición antiguos y nuevos. Asimismo, se analizarán estas implementaciones en función de la percepción de los estudiantes mediante una encuesta realizada a alumnos que hayan cursado alguna asignatura del área de Termofluidos. Finalmente, se establecerán protocolos de ensayo con el propósito de ayudar a generaciones futuras que cursen este tipo de asignaturas.

El trabajo se divide en las siguientes actividades a seguir:

Actividad 1: Realizar un diagnóstico de la operación actual de la Planta de Vapor a fin de establecer las variables relevantes y las brechas en términos de mediciones (OE1).

En primer lugar, se llevará a cabo una caracterización y un diagnóstico de la operación actual de la Planta, el cual se fundamentará en los balances de materia y energía obtenidos a partir del modelo térmico del sistema, los cuales serán resueltos mediante un programa de EES, además de identificar los resultados con mayor margen de error.

Actividad 2: Seleccionar e implementar mejoras en la instrumentación de la Planta de Vapor para las variables que intervienen en los balances de materia y energía (OE2).

A partir de la identificación de las variables y resultados con mayor disparidad en cuanto a mediciones, se plantearán cambios en su instrumentación, los cuales se analizarán críticamente en función de los criterios de evaluación, seleccionando e implementando las mejoras necesarias para llevar a cabo mediciones más precisas por parte de los estudiantes.

Actividad 3: Analizar los resultados de la implementación en base a la percepción del estudiantado y la brecha de error entre la instrumentación antigua y nueva (OE3).

Tras la implementación de las mejoras en la Planta de Vapor, se realizará un análisis comparativo de los márgenes de error entre los instrumentos de medición antiguos y nuevos, con el propósito de evaluar si las mejoras son efectivas. Asimismo, se llevará a cabo un análisis de las mejoras en función a la percepción de los estudiantes, mediante una encuesta realizada a alumnos que hayan cursado asignaturas relacionadas con el área de Termofluidos.

Actividad 4: Establecer protocolos de ensayo para las asignaturas del área de Termofluidos en base de los resultados de aprendizaje establecidos (OE4).

Finalmente, se establecerán protocolos de ensayo con el fin de fomentar y enriquecer la experiencia de aprendizaje de futuras generaciones que cursen asignaturas relacionadas con el área de termofluidos.

Cabe señalar que la planificación del proyecto se presenta a través de una Carta Gantt adjuntada en el Anexo A.

Capítulo 2: Análisis de Caso Actual

2.1 Caracterización de Planta a Vapor

2.1.1 Diagrama General

En la Figura 2.1 se encuentra el diagrama general de la Planta de Vapor, luego se encuentra la Tabla 1 con la numeración de los equipos en conjunto a sus respectivos nombres y marcas.

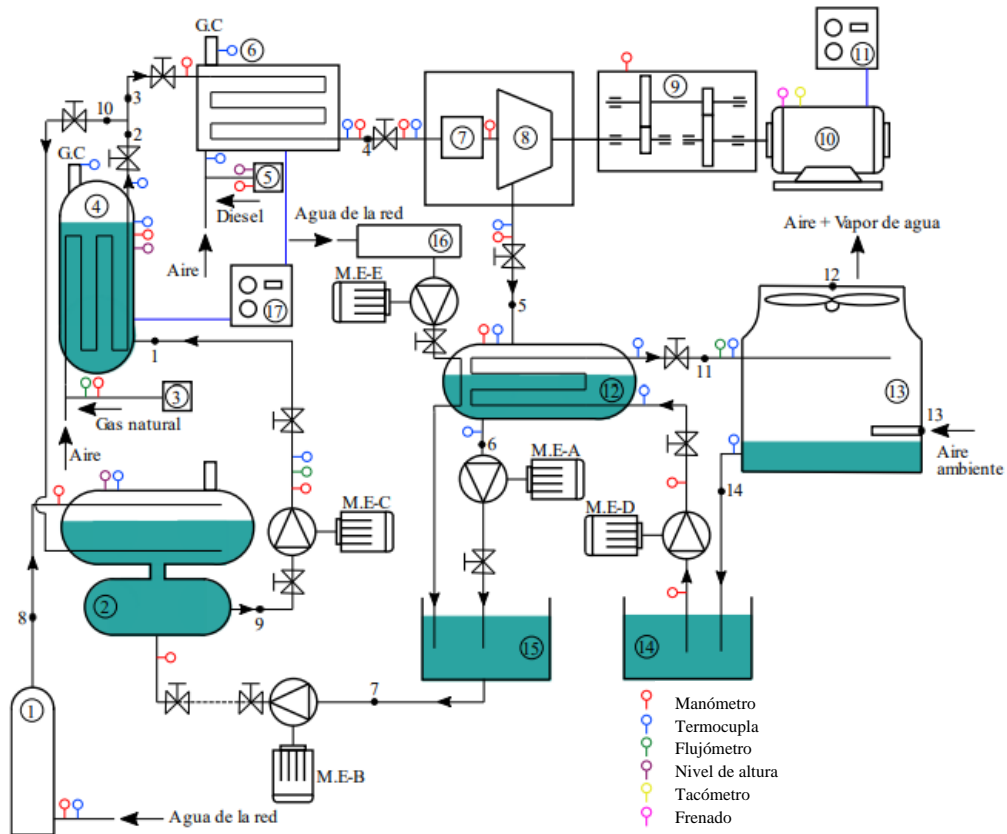


Figura 2.1: Diagrama Planta de Vapor del Laboratorio de Termofluidos [10]

Tabla 1: Numeración de Componentes de Planta de Vapor

NÚMERO	COMPONENTE	MARCA
1	Ablandador	AGUASIN
2	Desaireador y Estanque de Acumulación	SCHAUB ENGINEERING CO.
3	Quemador Caldera a Gas Natural	SAACKE ROSSPLET s.a.
4	Caldera	INEMI
5	Sobrecalentador	T. SUGDEN Ltd.
6	Quemador Sobrecalentador a Diésel	CIB UNIGAS S.P.A.
7	Cámara de Toberas	GREENWOOD & BATLEY Ltd.
8	Turbina	GREENWOOD & BATLEY Ltd.
9	Reductor de Velocidad	GREENWOOD & BATLEY Ltd.
10	Generador Eléctrico	GREENWOOD & BATLEY Ltd.
11	Panel Eléctrico y de Temperaturas	Sin info.
12	Condensador	W. SISSON & CO Ltd.
13	Torre de Enfriamiento	ACME
14	Pozo de Agua de Refrigeración	N.A.
15	Pozo de Condensado	N.A.
16	Estanque de Agua	N.A.
17	Panel Eléctrico y de Temperatura	Sin info.

2.1.2 Equipos

A continuación se presentará una caracterización de los equipos presentes en la Planta de Vapor, en donde sus especificaciones nominales serán mostradas en el Anexo B. Además, serán separados por estaciones para una mejor organización.

- **Estación 1: Ablandador – Desaireador – Caldera**

El ciclo comienza cuando el agua procedente del condensado y de la red pasa por el Ablandador (Figura 2.2), el cual elimina las impurezas provenientes del agua de red, con el fin de evitar inconvenientes en los equipos que se utilicen en el ciclo. Posteriormente, el agua entra en el Desaireador (Figura 2.3), donde se establece un contacto directo con el vapor, eliminando las impurezas de los gases [6], los cuales son liberados al exterior. Al finalizar este proceso, se produce un precalentamiento del agua mediante el vapor saturado extraído de la caldera, almacenándolo en el estanque de acumulación.



Figura 2.2: Ablandador [11]

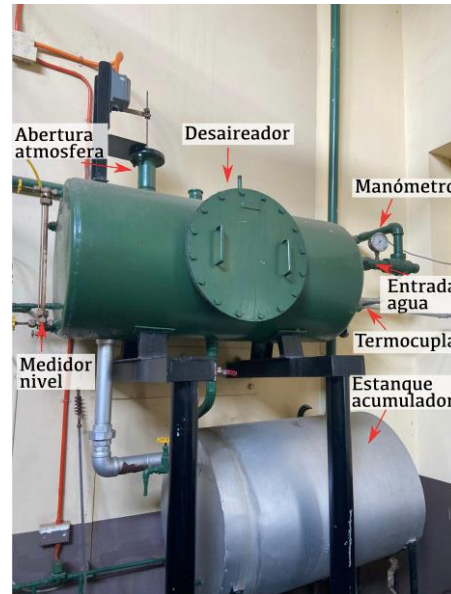


Figura 2.3: Desaireador y Estanque de Acumulación [11]

El agua precalentada es impulsada mediante una bomba de alimentación hacia la caldera (Figura 2.4), donde se produce la combustión entre gas natural y aire mediante un quemador (Figura 2.5), convirtiendo el agua en vapor saturado, el cual se utiliza en el desaireador y en el sobrecalentador. Es importante señalar que los gases generados son liberados al ambiente a través una chimenea.

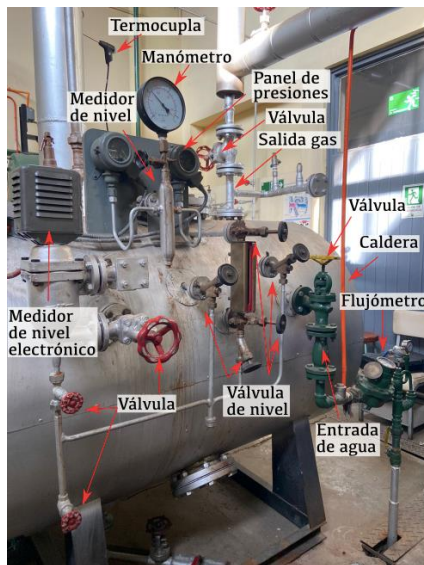


Figura 2.4: Caldera



Figura 2.5: Quemador a Gas Natural de la Caldera

Las especificaciones nominales de la Caldera, su quemador y la bomba de alimentación están en Anexo B.

- **Estación 2: Sobrecalentador**

El vapor saturado llega al sobrecalentador (Figura 2.6) donde su temperatura se eleva transformándolo en vapor sobrecalentado, el cual se dirige hacia la turbina. El vapor sobrecalentado posee mayor energía específica que el saturado, por lo que se vuelve más eficiente para generar energía en la turbina a vapor [11]. Para el aumento de temperatura en el sobrecalentador se utiliza un quemador diésel, el cual se encuentra en la parte inferior del equipo. Además, frente al sobrecalentador se encuentra un panel (Figura 2.7) en donde se visualizan las temperaturas medidas por las termocuplas a las entradas y salidas de los equipos.



Figura 2.6: Sobrecalentador [11]

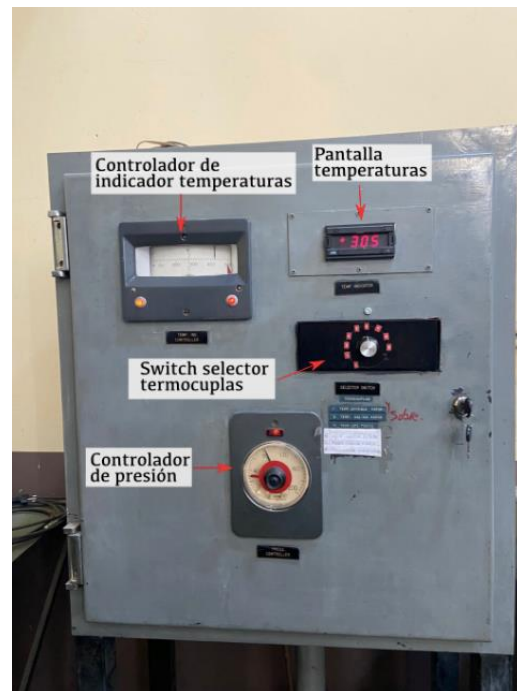


Figura 2.7: Panel Eléctrico y de Temperaturas [11]

Las especificaciones nominales del Sobrecalentador y su quemador están en Anexo B.

- **Estación 3: Turbina – Reductor de Velocidad – Generador Eléctrico**

El vapor sobrecalentado proveniente de la estación previa ingresa a la turbina de vapor (Figura 2.8), aumentando su presión y controlando el caudal a través toberas. La turbina se encarga de generar energía mecánica desde la energía cinética del vapor, el cual hace girar los álabes de la turbina generando una rotación del eje de 24000 RPM aproximadamente. Esta velocidad es reducida a 3000 RPM mediante un reductor de velocidad (Figura 2.9).

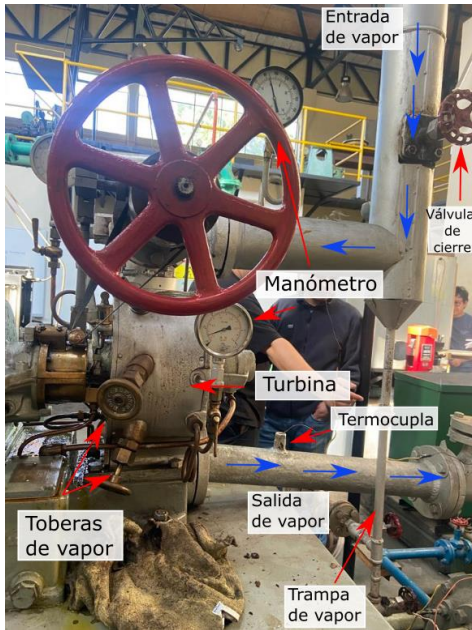


Figura 2.8: Turbina [11]

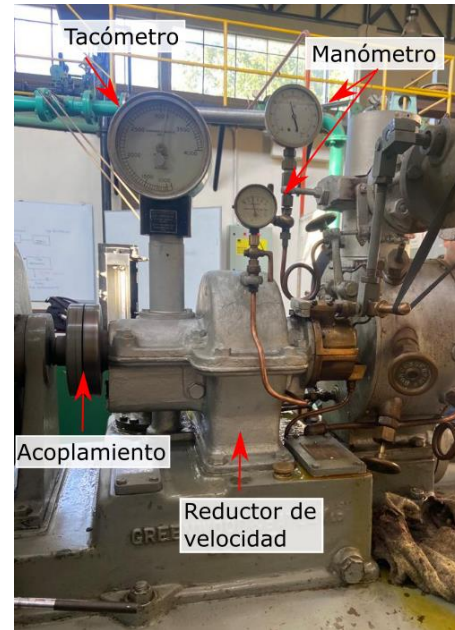


Figura 2.9: Reductor de Velocidad [11]

La velocidad de salida del reductor se utiliza en un generador eléctrico (Figura 2.10), encargado de generar corriente eléctrica, la cual es disipada en la cámara de resistencias para la obtención de voltaje y corriente producida.

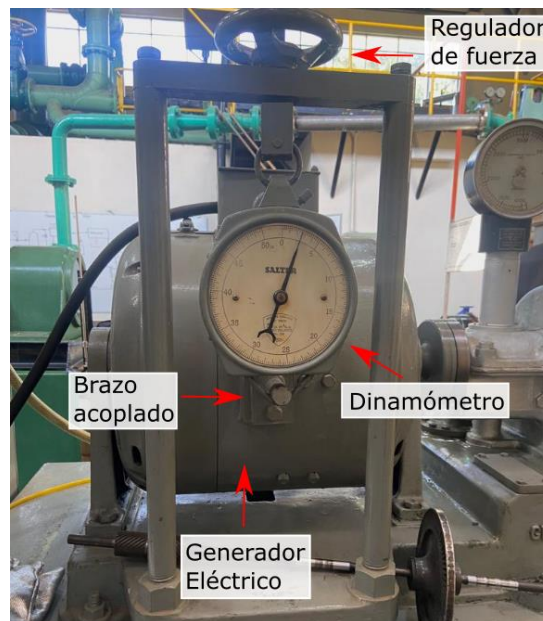


Figura 2.10: Generador Eléctrico [11]

A continuación del generador se ubica un panel eléctrico (Figura 2.11) en el que se encuentran los indicadores de corriente y voltaje, y un panel eléctrico que indica las temperaturas (Figura 2.12) recibas por las termocuplas en los circuitos de generación y refrigeración.

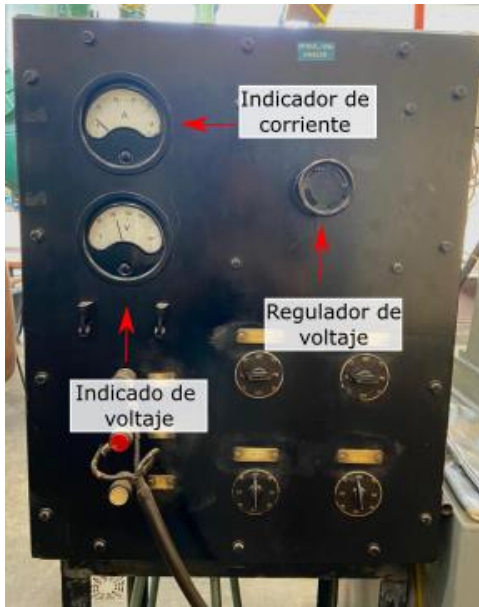


Figura 2.11: Panel Eléctrico Indicador de Corriente y Voltaje [11]



Figura 2.12: Panel Eléctrico de Temperaturas [11]

En la Figura 2.13 se visualiza la parte posterior de la estación de generación de energía.

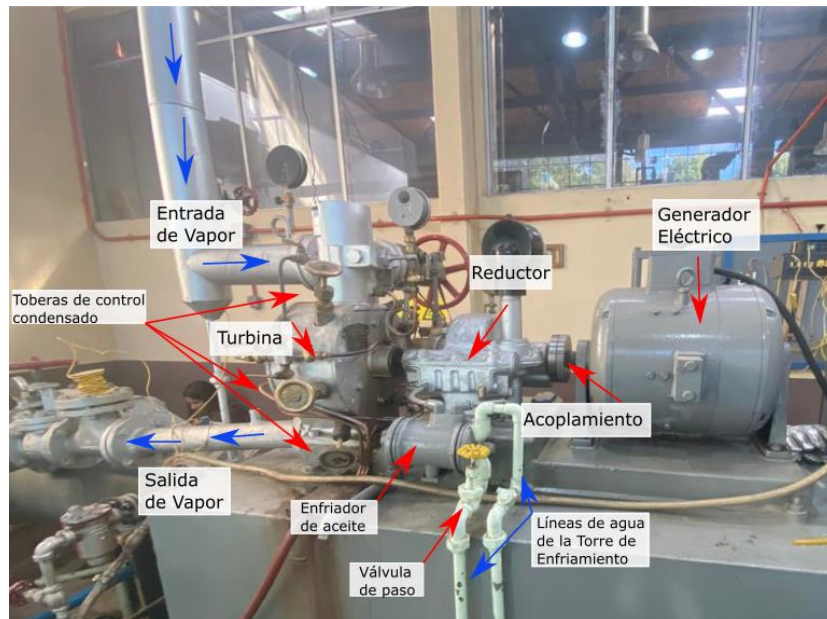


Figura 2.13: Estación de Generación, Parte Posterior [11]

Las especificaciones técnicas los equipos de esta estaciones se encuentran en Anexos B.

- **Estación 4: Condensador – Torre de Enfriamiento**

Finalmente, el vapor residual proveniente de la turbina ingresa a un condensador (Figuras 2.14 y 2.15), convirtiendo el fluido en líquido condensado, el cual es utilizado para reiniciar el ciclo de la Planta a Vapor.

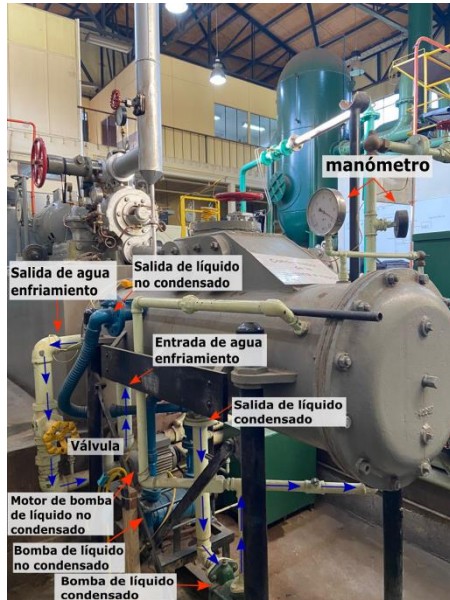


Figura 2.14: Condensador, Vista Frontal [11]

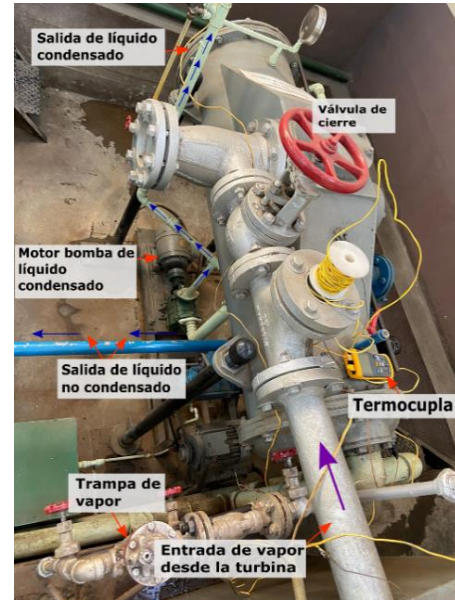


Figura 2.15: Condensador, Vista Posterior [11]

Para llevar a cabo el proceso de condensado se requiere un fluido de refrigeración, en este caso agua, que se trae directamente desde una torre de enfriamiento (Figura 2.16), el fluido se traslada mediante una bomba de agua situada en una zona de enfriamiento (Figura 2.17) entre la torre y el condensador.



Figura 2.16: Torre de Enfriamiento [11]



Figura 2.17: Zona de Agua de Enfriamiento [11]

Las especificaciones técnicas de los equipos utilizados en esta estación se encuentran en Anexos B.

2.1.3 Instrumentación

En las siguientes tablas se encuentran los instrumentos de medición utilizados por los equipos de la Planta a Vapor, mostrando su ubicación, rango de medición, error de lectura o incertidumbre y marca.

Es importante destacar que la precisión de los resultados obtenibles más adelante dependerá de la exactitud en la medición de las variables registradas a partir de la instrumentación de la Planta. La exactitud está determinada por los errores asociados a cada medición, los cuales pueden depender de dos factores. El primero depende de la clase de instrumento de medición en donde su error se debería encontrar en los catálogos, los cuales no se encuentran disponibles, aunque para el caso de las industrias se permite un error aproximado del 2% [8]. El segundo factor y el cual se implementará en este trabajo corresponde al error en la lectura del instrumento de medición, dependiendo de la escala y del rango de medida del instrumento, aportando así la incertidumbre que aporta el instrumento al medir la variable. Así, la incertidumbre de un instrumento de medición es igual a la mitad de la lectura más pequeña que se puede observar en su escala [8], la cual será utilizada para el cálculo de error.

A continuación se muestran los 17 manómetros operativos en la Planta de Vapor.

Tabla 2: Instrumentos de Medición de Presión

Ubicación	Rango	Incertidumbre	Marca
Alimentación agua de red	0 – 350 psi	$\pm 2,5$ psi	WIKA
Salida Ablandador	0 – 30 psi	$\pm 0,1$ psi	Sin info.
Salida Desaireador	0 – 60 psi	$\pm 0,5$ psi	WIKA
Entrada de GN	0 – 60 mbar	± 1 mbar	CEWAL
Entrada de GN al Quemador	0 – 60 mbar	± 1 mbar	CEWAL
Caldera	0 – 220 psi	$\pm 2,5$ psi	WIKA
Entrada Agua Caldera	0 – 150 psi	$\pm 2,5$ psi	KOSLAN
Entrada Sobrecalentador	0 – 140 psi	± 1 psi	WIKA
Salida Sobrecalentador	0 – 200 psi	± 1 psi	WINTERS
Entrada Turbina	0 – 200 psi	$\pm 2,5$ psi	WEISS
Turbina	-30 – 0 inHg	$\pm 0,25$ inHg	WIKA
Salida Turbina	0 – 200 psi	± 1 psi	NUOVA FIMA
Entrada Reductor	0 – 15 psi	$\pm 0,5$ psi	GREENWOOD & BATLEY
Salida Condensador	0 – 30 inHg	$\pm 0,25$ inHg	WEKSLER
Salida TE	0 – 4 kg/cm ²	$\pm 0,05$ kg/cm ²	Sin info.
Entrada Bomba D	-30 – 0 inHg	$\pm 0,25$ inHg	WIKA
Salida Bomba D	0 – 60 psi	$\pm 0,2$ psi	WINTERS

Cabe señalar que las incertidumbres se convertirán a la misma unidad de medida que la variable medida.

Además, se encuentran 7 dispositivos de medición de temperatura operativos en la Central, entre ellos termocuplas y termómetros. En la Tabla siguiente se identifican.

Tabla 3: Instrumentos de Medición de Temperatura

Ubicación	Rango	Incertidumbre	Marca
Desaireador	0-150 °C	± 1 °C	WEKSLER
Agua Entrada Caldera	Sin info.	± 1 °C	WIKA
Entrada Sobrecalentador	Sin info.	± 1 °C	CAMBRIDGE
Salida Sobrecalentador	Sin info.	± 1 °C	CAMBRIDGE
Salida Condensador	0 – 300 °C	± 1 °C	USG
Entrada TE	0 – 110 °C	± 1 °C	Sin info.
Salida TE	0 – 110 °C	± 1 °C	Sin info.

Para la medición de flujo se utilizan 3 flujómetros, los cuales se muestran a continuación.

Tabla 4: Instrumentos de Medición de Flujo

Ubicación	Rango	Incertidumbre	Marca
Agua de Red	0 – 100 litros	± 1 litro	Sin info.
Agua Entrada Caldera	0 – 100 litros	± 1 litro	TYLORS
Torre de Enfriamiento	Sin info.	± 1 litro	SENSUS

Además, para las mediciones en la estación de generación se tienen los siguientes instrumentos.

Tabla 5: Instrumentos de Medición para Estación de Generación

Instrumento	Rango	Incertidumbre	Marca
Voltímetro	0 – 300 V	± 5 V	Sin info.
Amperímetro	0 – 50 A	± 1 A	Sin info.
Tacómetro	0 – 4000 RPM	± 50 RPM	GREENWOOD & BATLEY
Dinamómetro	0 – 50 lb	$\pm 0,1$ lb	SALTER

Para finalizar con la instrumentación se utilizan 2 medidores de nivel de agua encontrados en el Desaireador y en la Caldera.

2.2 Balances de Masa y Energía

Para realizar los balances de masa y energía de los componentes de la Planta de Vapor se considera un régimen estacionario y los números asignados dependen de la Figura 2.1. Además, para facilitar los cálculos se asumen algunos datos los cuales serán mencionados cuando sean ocupados.

La ecuación general para un balance de masa en régimen transiente está dada mediante la siguiente ecuación:

$$\sum \dot{m}_{ent} - \sum \dot{m}_{sal} = \frac{dM_{sist}}{dt} \quad (1)$$

Pero al considerarse régimen estacionario la ecuación anterior se simplifica a:

$$\sum \dot{m}_{ent} - \sum \dot{m}_{sal} = 0 \quad (2)$$

Lo mismo ocurre para las ecuaciones de balances de energía.

2.2.1 Circuito de Humos

En este apartado se encontrarán los balances de masa y energía de los equipos pertenecientes al circuito de humos de la Planta, correspondiente a la caldera y el sobrecalentador. Para una mejor comprensión de las variables, en las Figuras 2.18 y 2.19 se encuentran los volúmenes de control de la caldera y el sobrecalentador respectivamente.

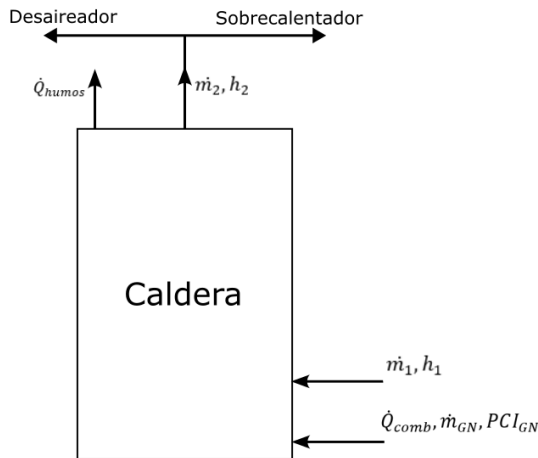


Figura 2.18: Volumen de Control Caldera

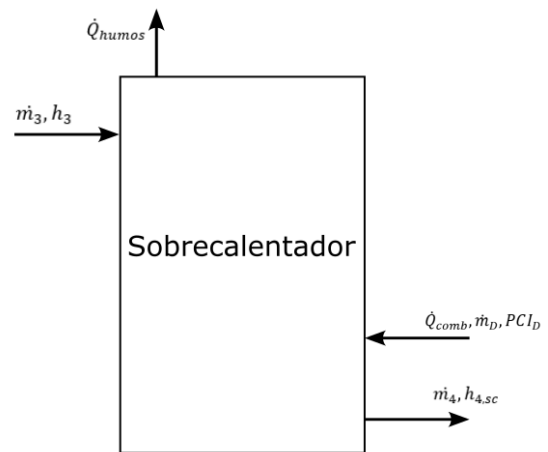


Figura 2.19: Volumen de Control Sobrecalentador

Los balances de masa y energía de la caldera están dados por las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{comb} + \dot{m}_1 \cdot h_1 = \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{Q}_{humos} \quad (4)$$

Además, se sabe que:

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \dot{m}_2 \cdot h_2 - \dot{m}_1 \cdot h_1 \quad (5)$$

Por lo que reemplazando en la ecuación 4, se tiene que:

$$\dot{Q}_{\text{humos}} = \dot{Q}_{\text{comb}} - \dot{Q}_{\text{útil}} \quad (6)$$

Por otro lado, para determinar la ecuación 5, se determinan las entalpías mediante:

$$h_1 = h(\text{Agua}; T = T_{w,1}, P = P_{w,1})$$

$$h_2 = h(\text{Agua}; T = T_{v,2}, P = P_{v,2})$$

El rendimiento de la caldera por método directo está dado por:

$$\eta_{\text{caldera}} = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\dot{V}_{GN} \cdot PCI_{GN}} \quad (7)$$

Donde el flujo volumétrico se determina a través de la siguiente expresión:

$$\dot{V}_{GN} = \frac{V_{GN}}{\Delta t} \quad (8)$$

Donde V_{GN} corresponde al volumen de gas natural utilizado y Δt la diferencia de tiempo, estos valores fueron extraídos de un ensayo realizado en el curso de Centrales de Energía y están presentes en el programa con el cual se resolvieron las ecuaciones [Anexo C].

Para determinar el flujo másico en el punto 1 se tiene que:

$$\dot{m}_1 = \rho_w \cdot \frac{\Delta V_w}{\Delta t_w} \quad (9)$$

Además, el vapor saturado a la salida de la caldera se divide en dos caminos, hacia el desaireador y hacia el sobrecalentador (ver Figura 2.1). Los balances de masa y energía en dicho punto de separación están dados por las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{10} + \dot{m}_3 \quad (10)$$

$$\dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_3 \cdot h_3 \quad (11)$$

Para finalizar el circuito de humos se tienen los balances de masa y energía del sobrecalentador, los cuales están dados por las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{\text{comb}} + \dot{m}_3 \cdot h_3 = \dot{m}_4 \cdot h_{4,sc} + \dot{Q}_{\text{humos}} \quad (13)$$

Sabiendo que:

$$\dot{Q}_{sob} = \dot{m}_3(h_{4,sc} - h_3) \quad (14)$$

Donde las entalpías están dadas por:

$$h_3 = h(\text{Agua}; T = T_{v,3}, P = P_{v,3})$$

$$h_{4,sc} = h(\text{Agua}; T = T_{v,4,sc}, P = P_{v,4,sc})$$

Con lo que se puede obtener el rendimiento del sobrecalentador mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_{sob} = \frac{\dot{Q}_{sob}}{\dot{m}_D \cdot PCI_D} \quad (15)$$

Para determinar el flujo másico del diésel se tiene:

$$\dot{m}_D = \rho_D \cdot \frac{\Delta V_D}{\Delta t_D} \quad (16)$$

2.2.2 Circuito Hidráulico

Dentro del circuito hidráulico se encuentra el precalentador o desaireador y las bombas, las cuales son 5 en total y estarán clasificadas según su ubicación más adelante.

A continuación se presenta el volumen de control del precalentador:



Figura 2.20: Volumen de Control Desaireador

A partir de la Figura 2.20 se deducen los balances de masa y energía del precalentador se tienen las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$\dot{m}_8 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_9 \quad (17)$$

$$\dot{m}_8 \cdot h_8 + \dot{m}_{10} \cdot h_{10} = \dot{m}_9 \cdot h_9 \quad (18)$$

En donde a partir del esquema mostrado en la Figura 2.1 se tiene que:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_9 \quad (19)$$

$$h_2 = h_3 = h_{10} \quad (20)$$

Y las entalpías están dadas por:

$$h_8 = h(\text{Agua}; T = T_{w,8}, P = P_{w,8})$$

$$h_9 = h(\text{Agua}; T = T_{w,9}, P = P_{w,9})$$

$$h_{10} = h(\text{Agua}; T = T_{v,10}, P = P_{v,10})$$

En la Planta se encuentran 5 bombas, las cuales se clasificarán mediante su ubicación:

- Bomba A: ubicada entre el condensador y el pozo de condensado.
- Bomba B: ubicada entre el pozo de condensado y el desaireador (actualmente no operativa).
- Bomba C: ubicada entre el desaireador y la caldera.
- Bomba D: ubicada entre el pozo de agua de refrigeración y el condensador.
- Bomba E: ubicada entre el estanque de agua de red y el condensador.

Para la Bomba A, se tiene que la potencia isentrópica es:

$$\dot{N}_{s,bbA} = \dot{m}_6(h_{7s} - h_6) \quad (21)$$

Donde el término de diferencias de entalpías está dado por:

$$h_{7s} - h_6 = v_6 \cdot (P_{w,7} - P_{w,6}) \quad (22)$$

Reemplazando en la ecuación 21 se tiene:

$$\dot{N}_{s,bbA} = \dot{m}_6 \cdot v_6 \cdot (P_{w,7} - P_{w,6}) \quad (23)$$

La presión $P_{w,7}$ corresponde a la del pozo de condensado, correspondiente a la atmosférica.

Para determinar el volumen específico se tiene que:

$$v_6 = v(\text{Agua}; T = T_{w,6}, P = P_{w,6})$$

Finalmente, la potencia isentrópica se puede relacionar con la eficiencia isentrópica, la cual varía entre 60% y 90% dependiendo del fabricante (se utilizará una eficiencia del 90% para las 4 bombas en operación), obteniendo así la potencia real:

$$\dot{N}_{bbA} = \frac{\dot{N}_{s,bbA}}{\eta_{s,bbA}} \quad (24)$$

Además, para determinar la entalpía real en el punto 7 se tiene:

$$h_7 = h_6 + \frac{v_6 \cdot (P_{w,7} - P_{w,6})}{\eta_{s,bbA}} \quad (25)$$

De la misma manera se determinan los parámetros de la Bomba E, los cuales serían los mismos que la Bomba A. Debido a que la Bomba B no se encuentra en operación, no se realizarán sus balances.

Para la Bomba C, encargada de impulsar el agua desde el Desaireador hacia la Caldera se tiene que:

$$\dot{N}_{s,bbC} = \dot{m}_9 \cdot v_9 \cdot (P_{w,9} - P_{w,1}) \quad (26)$$

Donde:

$$v_9 = \text{Volume}(\text{Agua}; h = h_9, P = P_{w,9})$$

Su potencia real quedaría mediante la siguiente expresión:

$$\dot{N}_{bbC} = \frac{\dot{N}_{s,bbC}}{\eta_{s,bbC}} \quad (27)$$

Para finalizar con las bombas se tienen las ecuaciones de la Bomba D, la cual impulsa el agua de refrigeración desde el pozo de la torre hacia el condensador. Su potencia isentrópica y real se determinan mediante las siguientes expresiones respectivamente:

$$\dot{N}_{s,bbD} = \dot{m}_{11} \cdot v_7 \cdot (P_{w,11} - P_{w,7}) \quad (28)$$

$$\dot{N}_{bbD} = \frac{\dot{N}_{s,bbD}}{\eta_{s,bbD}} \quad (29)$$

Donde el volumen específico se calcula mediante:

$$v_7 = \text{Volume}(\text{Agua}; h = h_7, P = P_{w,7})$$

2.2.3 Circuito de Generación

El circuito de generación corresponde a la estación 3 mencionada anteriormente, donde se incluye la turbina, el reductor de velocidad y el generador eléctrico. En la Figura 2.21 se muestra el volumen de control de la turbina.

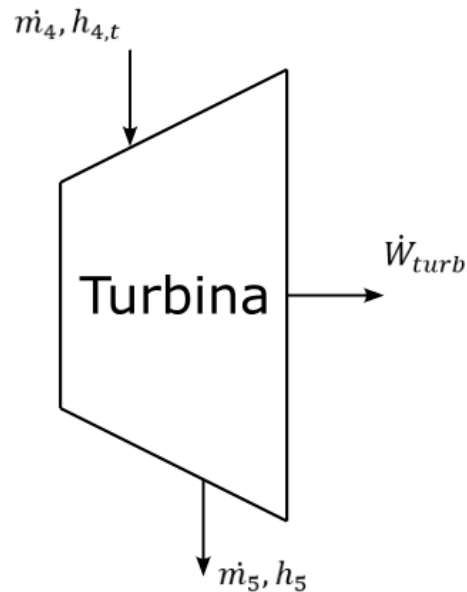


Figura 2.21: Volumen de Control de la Turbina a Vapor

Los balances de masa y energía de la turbina están dados por las ecuaciones 30 y 31 respectivamente. Cabe mencionar que no se consideran eventuales fugas de vapor en la turbina.

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (30)$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_4(h_{4,t} - h_5) \quad (31)$$

Las entalpías utilizadas están determinadas por:

$$h_{4,t} = h(\text{Agua}; T = T_{v,4,t}, P = P_{v,4,t})$$

$$h_5 = h(\text{Agua}; T = T_{v,5}, P = P_{v,5})$$

El rendimiento isentrópico de la turbina está dado por:

$$\eta_{turbina} = \frac{h_{4,t} - h_5}{h_{4,t} - h_{5s}} \quad (32)$$

Donde la entalpía específica del punto 5 está dada por:

$$h_{5s} = h(\text{Agua}, s = s_4, P = P_{v,5})$$

$$s_4 = s(\text{Agua}, P = P_{v,4,t}, T = T_{v,4,t})$$

Para el cálculo de la potencia al eje del generador se tiene:

$$N_{eje} = F \cdot R \cdot \omega \quad (33)$$

Y para el cálculo de la potencia eléctrica del generador se tiene:

$$N_e = V \cdot I \quad (34)$$

Para finalizar se tiene el rendimiento del generador, el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$\eta_g = \frac{N_e}{N_{eje}} \quad (35)$$

2.2.4 Circuito de Refrigeración

Dentro del circuito de refrigeración se encuentra el Condensador y la Torre de Enfriamiento. El volumen de control del condensador se encuentra en la Figura 2.22, deduciendo los balances de masa y energía mostrados en las ecuaciones 36 y 37 respectivamente.

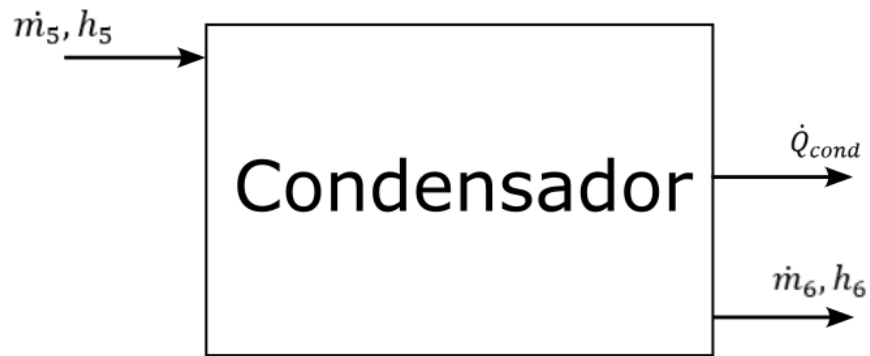


Figura 2.22: Volumen de Control del Condensador

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6, h_6 \quad (36)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_5(h_5 - h_6) \quad (37)$$

Donde las entalpías se obtienen mediante:

$$h_5 = h(\text{Agua}, P = P_{v,5}, T = T_{v,5})$$

$$h_6 = h(\text{Agua}, P = P_{w,6}, T = T_{w,6})$$

Para la Torre de Enfriamiento se tienen dos balances de masa, de aire y agua, los cuales están dados mediante las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} \quad (38)$$

$$\dot{m}_{12} \cdot w_{12} + \dot{m}_{14} = \dot{m}_{13} \cdot w_{13} + \dot{m}_{11} \quad (39)$$

Donde:

$$w_{12} = (\text{Aire}; P = P_{a,12}, T = T_{a,12}, \phi = 1)$$

$$w_{13} = (\text{Aire}; P = P_{a,13}, T = T_{a,13}, \phi = 0,76)$$

El balance de energía de la Torre está dado por:

$$\dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{m}_{13} \cdot h_{13} = \dot{m}_{12} \cdot h_{12} + \dot{m}_{14} \cdot h_{14} \quad (40)$$

Donde las entalpías se determinan mediante:

$$h_{11} = (\text{Agua}; P = P_{w,11}, T = T_{w,11})$$

$$h_{12} = (\text{Aire}; P = P_{a,12}, T = T_{a,12}, \phi = 1)$$

$$h_{13} = (\text{Aire}; P = P_{a,13}, T = T_{a,13}, \phi = 0,76)$$

$$h_{14} = (\text{Agua}; P = P_{w,14}, T = T_{w,14})$$

Debido al intercambio de calor entre el agua y el aire en la TE, el flujo de agua a la salida de la TE es menor que a la entrada de esta, por lo que se debe reponer el flujo de agua en la Torre, el cual está dado por:

$$\dot{m}_{rep} = \dot{m}_{11} - \dot{m}_{14} \quad (41)$$

2.2.5 Rendimiento Planta a Vapor

Finalmente, el rendimiento del ciclo de la Planta a Vapor está dado mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_{ciclo} = \frac{N_e - (\dot{N}_{bba,A} + \dot{N}_{bba,C} + \dot{N}_{bba,D} + \dot{N}_{bba,E})}{\dot{Q}_{comb}} \quad (42)$$

Donde,

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{m}_{GN} \cdot PCI_{GN} + \dot{m}_D \cdot PCI_D \quad (43)$$

2.3 Análisis de Mediciones Históricas

Para realizar un diagnóstico actual de la Planta de Vapor se deben comparar las mediciones y resultados de los balances de masa y energía de los equipos de la Central, con el fin de obtener un grado de error entre estos. Para hacer efectiva esta comparación se dispondrán de datos promedios medidos en diferentes años por alumnos de la universidad, los cuales fueron extraídos de [7], [8], [10], [11], [12] y [13], los cuales se presentan a continuación.

2.3.1 Recopilación de Información

En la siguiente tabla se muestran las mediciones históricas recopiladas.

Tabla 6: Mediciones Históricas

Variable Medida		Valores Promedios					
Caldera		1999	2000	2002	2018	2022	2023
$T_{w,1}$	Temperatura de entrada del agua, °C	94,2	94,2	87	84,9	73,6	80,7
$T_{v,2}$	Temperatura de salida del vapor, °C	171	171	169	163,4	170	167,2
$P_{w,1}$	Presión de trabajo, kPa (Abs)	637	637	674,7	681,2	699,7	692,3
$P_{v,2}$	Presión de salida del vapor, kPa (Abs)	658,6	658,6	674,7	661,4	693,8	699,3
\dot{V}_C	Flujo volumétrico, m ³ /s ($\cdot 10^{-3}$)	2,4	2,4	8,1	3,5	3,5	3,5
Sobrecalentador							
$T_{v,4,sc}$	Temperatura de vapor a la salida, °C	261	261	229	247,7	255,4	263,8
$P_{v,3}$	Presión a la entrada, kPa (Abs)	658,6	658,6	674,7	661,4	693,8	699,3
$P_{v,4,sc}$	Presión a la salida, kPa (Abs)	665,5	665,5	674,7	681,2	704,2	697,3
\dot{m}_D	Flujo másico Diésel, kg/s ($\cdot 10^{-4}$)	3,2	3,2	2,2	2,6	2,6	2,6
Turbina							
$T_{v,4,t}$	Temperatura del vapor entrada, °C	204,8	205,8	210	231	254	304,8
$T_{v,5}$	Temperatura del vapor a la salida, °C	68,6	101,3	76	86,3	73,6	98,6
$P_{v,4,t}$	Presión del vapor entrada, kPa (Abs)	798,3	784,5	764,9	681,2	730	685,8
$P_{v,5}$	Presión del vapor salida, kPa (Abs)	5,9	35,8	16,2	14,4	8,5	8,9
Generador							
V	Voltaje, V	150	155	155	170,7	154,5	130
A	Intensidad, A	12,1	21,8	21,8	23,1	5,3	4
ω	Velocidad angular, rad/s	319,9	280,1	280,1	290,2	275,2	333,4
F_{freno}	Fuerza de frenado, N	28,5	48,9	48,9	56,9	17,8	11,9
Condensador							
$T_{w,6}$	Temperatura del agua a la salida, °C	32	27	53	25	24,7	26,4
$P_{w,6}$	Presión a la salida, kPa (Abs)	5,4	36,3	14,8	7,3	4,6	5
Torre de Enfriamiento							
$T_{w,11}$	Temperatura del agua a la entrada, °C	28,1	24	50	19,6	19,6	19,3
$T_{w,14}$	Temperatura del agua a la salida, °C	18,7	18,3	22	16	17,7	18,3

Desaireador							
$P_{v,8}$	Presión de vapor, kPa	130	130	102	130	130	130

Cabe destacar que para la caldera y sobrecalentador en el año 2000 no se encontraron mediciones por lo que se utilizaron los mismos datos que el año anterior, mismo caso ocurre con las variables del generador para el año 2002, utilizando mediciones del año 2000.

Si bien no se especifica el año de cambio de combustible en el quemador de la caldera, desde que se implementó fue impulsada mediante diésel, luego fue cambiada por gas natural diluido y finalmente por gas natural, la cual se encuentra actualmente operativa. Por lo que se utiliza el diésel como combustible para la caldera en los 2 primeros casos de estudio, luego gas natural diluido y gas natural para los últimos 3 casos.

2.3.2 Análisis de Resultados

Luego de recopilar la información necesaria para resolver los balances de masas y energías, utilizando un programa del software EES (adjuntado en Anexo C) se obtuvieron los siguientes resultados y errores:

Tabla 7: Resumen de Resultados

Variable	Resultados					
Combustible	Diésel		GN Diluido	Gas Natural		
PCI, kJ/kg	44.715		18.811	35.441		
Caldera	1999	2000	2002	2018	2022	2023
$\dot{Q}_{\text{útil}}$, kW	101,1±0,3	101,1±0,3	102,6±0,3	97,5±0,2	100,7±0,2	98,8±0,2
η_{cald} , %	94,2±0,3	94,2±0,3	67,3±0,2	79,6±0,2	82,1±0,2	80,6±0,2
Sobrecalentador (Diésel)						
\dot{Q}_{sob} , kW	7,5±0,1	7,5±0,1	5,1±0,1	6,7±0,1	6,9±0,1	7,7±0,1
η_{sob} , %	52,4±0,8	52,4±0,8	51,1±1,2	58,6±0,7	59,8±0,7	67,4±0,7
Turbina						
\dot{W}_{turb} , kW	8,4±0,1	6,3±0,1	8,5±0,1	9,1±0,1	11,8±0,1	14±0,1
η_{turb} , %	29,8±5,9	32,2±1,9	35,9±3,4	39,7±4,1	44,6±6,4	50,4±6,9
Generador						
N_{eje} , kW	2,8±0,1	4,3±0,1	4,3±0,1	5,1±0,1	1,5±0,1	1,2±0,1
N_e , kW	1,8±0,2	3,4±0,2	3,4±0,2	3,9±0,2	0,8±0,2	0,5±0,1
η_g , %	64,2±5,9	79,6±4,7	79,6±4,7	77±4,3	53,9±10,4	42,3±10,8
Condensador						
\dot{Q}_{cond} , kW	94,3±0,2	97,3±0,2	91,9±0,2	92,4±0,2	92,3±0,2	93,3±0,2
Combustible utilizado						
\dot{Q}_{comb} , kW	121,6	121,6	162,3	134,1	134,1	134,1
Ciclo Planta de Vapor						
η_{ciclo} , %	2,6±0,1	3,9±0,2	2,9±0,1	3,9±0,2	1,6±0,1	1,4±0,1

Donde:

$\dot{Q}_{\acute{u}til}$: Calor transferido por la caldera.	N_{eje}	: Potencia al eje del generador.
η_{cald}	: Rendimiento de la caldera.	N_e	: Potencia eléctrica del generador.
\dot{Q}_{sob}	: Calor transferido por el sobrecalentador.	η_g	: Rendimiento del generador.
η_{sob}	: Rendimiento del sobrecalentador.	\dot{Q}_{cond}	: Calor transferido por el condensador.
\dot{W}_{turb}	: Trabajo entregado por la turbina.	\dot{Q}_{comb}	: Calor transferido por el combustible.
η_{turb}	: Rendimiento de la turbina.	η_{ciclo}	: Rendimiento del ciclo.

No se considera error en el \dot{Q}_{comb} debido a que no se conocen las incertidumbres de los instrumentos de medición de los combustibles. Además, es importante señalar que el combustible utilizado por el quemador del sobrecalentador fue el mismo hasta 2023 (Diésel) y para el quemador de la caldera se utilizó Diésel hasta el año 2000, gas natural diluido para el año 2002 y para los últimos años gas natural.

2.4 Discusión de Resultados

Luego de realizar una recopilación de información histórica y compararla entre sí, se determinaron los resultados principales de los balances de masa y energía. Además, se realizó un cálculo de error derivado de las incertidumbres de cada instrumento de medición. Los valores determinados se aproximaron a una cifra significativa para términos de orden y comparación más eficaz.

A pesar de que la mayoría de los resultados y errores fueron coherentes, con un grado de confiabilidad del 95% aproximadamente, aún existen algunos que no lo son, principalmente asociados a los rendimientos de la turbina y el generador. Esto se debe a que la incertidumbre de los instrumentos de medición para las variables de estos equipos es elevada en comparación a los valores experimentales, por lo que el error de manipulación y toma de datos de estos instrumentos es más común que el resto. Es necesario destacar también el error de medición mediante el ojo humano y que la mayoría de estos datos fueron registrados en grupo, lo que impide la concentración durante la medición.

Un factor externo a la toma de mediciones depende de las fugas que se puedan encontrar en varios puntos del Ciclo, las cuales no son las mismas todos los años y afectan directamente al rendimiento del ciclo. Otro factor depende del funcionamiento de la Planta al momento del registro de datos, ya que al investigar en diferentes trabajos de años anteriores ([7], [8] y [12]), las mediciones varían en función del flujo de refrigerante suministrado, la cantidad y tipo de toberas utilizadas en la turbina, lo cual no se especifica en todos los años de mediciones.

Debido a esto, se incrementa la necesidad de modificar la instrumentación de medición e implementar un registro de variables continuo, ya que al llevar a cabo un registro de datos automático, se espera que los errores disminuyan, lo que otorga resultados óptimos de aprendizaje para los alumnos.

Es importante mencionar que, a pesar de que existe un sobredimensionamiento en la Central y, por ende, el rendimiento del ciclo es bajo, en los últimos dos años, las mediciones de intensidad fueron demasiado bajas, lo que ha provocado un error elevado en el rendimiento del generador, lo cual afecta directamente el rendimiento del ciclo.

Por último, se recomienda enfatizar en el cambio de instrumentos de medición y/o registro de datos asociados a la turbina y generador, ya que estos fueron los que presentaban mayor porcentaje de error en cuanto a sus resultados.

Capítulo 3: Alternativas de Actualización

3.1 Propuestas de Instrumentación

3.1.1 Análisis de Alternativas

A continuación se analizarán 3 propuestas realizadas para la actualización de la instrumentación de Planta de Vapor del Laboratorio de Termofluidos. Las propuestas y cotizaciones de las 2 empresas externas se encuentran en el Anexo D.

1) Propuesta Empresa A

La primera propuesta por parte de la Empresa A, propone lo siguiente:

- Desarrollo e implementación de un sistema local con pantalla táctil de medición de variables de operación.
- Suministro y montaje de 2 flujómetros para agua caliente.
- 1 Flujómetro Vortex para vapor sobrecalentado.
- 1 Flujómetro másico térmico para gas natural.
- 12 Sensores de temperatura.
- 9 Transmisores de presión.
- 2 Transmisores de presión diferencial.
- 1 Medidor de energía corriente continua del flujo de gas mediante una válvula modulante de quemador del sobrecalentador.
- 1 Flujómetro mecánico con salida de pulsos para medición de agua de refrigeración.
- Montaje de quemador a gas natural para sobrecalentador.

2) Propuesta Empresa B

La segunda propuesta proviene de la Empresa B y propone:

- 1 Flujómetro Vortex.
- 1 Registrador Digital.
- Instalación y configuración de equipos registradores en tableros existentes.
- Instalación de pantalla para visualización de datos.
- Control a gas para regulación de energía.
- Capacitación a personal para operación de equipos.

3) Propuesta Propia

La tercera y última propuesta proviene por parte propia y contempla lo siguiente:

- 1 Flujómetro Vortex para vapor sobrecalentado.
- 1 Registrador Digital.
- 2 Flujómetros másicos para gas natural.
- 2 Termocuplas para gases de combustión.
- 1 Analizador de gases.
- Montaje de quemador a gas natural para sobrecalentador.

- 8 Transmisores de presión.
- 1 Psicómetro.
- 4 Sistemas de trampas de vapor, 2 para sistema de vapor saturado y 2 para sistema de vapor sobrecalentado.
- 10 m de Aislante térmico para ductos en la sala de calderas.

3.1.2 Criterios de Evaluación

Dentro de los criterios de evaluación para la elección de propuesta se encuentran:

- **Accesibilidad de mediciones:** Este criterio es crucial para el registro de mediciones de forma experimental por parte del estudiante, ya que en varios lugares de la Planta el acceso a las mediciones de presión y temperatura no es sencillo ni cómodo, dado que se encuentran en lugares de gran altura como a la entrada del sobrecalentador (ver Fig. 2.6) o en la torre de enfriamiento (ver Fig. 2.16), o en lugares de baja altura e inestabilidad de terreno como en la zona de agua de enfriamiento (ver Fig. 2.17), donde se encuentran los manómetros y bombas de dicho lugar. Ambos casos dificultan la toma de datos para el estudiante.
- **Visibilidad de mediciones:** Al igual que el caso anterior, uno de los problemas actuales de la Central radica en la visibilidad de ciertos instrumentos de medición, utilizando como ejemplo los mismos que el criterio anterior y enfocándose en la zona de agua de enfriamiento. La visibilidad de los manómetros es escasa, ya que se encuentra en un lugar con poca iluminación y los cristales de los instrumentos no se encuentran limpios para una visibilidad adecuada.
- **Porcentaje de error:** Este criterio se basa principalmente en acotar las brechas de medición, cuando se implementen instrumentos con menos rango de error, las mediciones serán más exactas por lo que se obtendrán resultados más precisos, facilitando la enseñanza del alumnado y mejorando su habilidad para tomar decisiones.
- **Pérdidas de calor:** Las pérdidas de calor se encuentran presentes a lo largo de la Planta, ya sea por convección o conducción, generando mediciones de temperaturas variables, lo que implica resultados con menor grado de exactitud. Un ejemplo claro en la Central es la variación de temperaturas a la salida y entrada de dos equipos consecutivos, lo cual se refleja en la tabla de mediciones históricas (Tabla 6), en donde en algunos casos las temperaturas tienen una gran diferencia de temperaturas, principalmente por el hecho de pérdidas de calor en los ductos que se transporta el fluido. Hace aproximadamente 10 años se contaba con asbesto de aislante, pero por nuevas normas de seguridad fue retirado de la Planta.
- **Vida útil:** En última instancia, se evalúa la durabilidad de los instrumentos de medición que se pretenden implementar, el cual depende de tres factores principalmente, el primero proveniente del fabricante y la duración estimada para el instrumento, el segundo depende de la mantención que se le realice, las cuales deben cumplirse según lo diga el fabricante, y por último el uso y manipulación que se le dé al instrumento, el cual deberá realizarse de manera cautelosa.

Para obtener una selección acorde a los criterios de evaluación se establecerá una matriz de priorización, con el fin de evaluar las alternativas según la ponderación asignada en la Tabla 8, mientras más alto el puntaje, mejor obedece del criterio.

Tabla 8: Ponderación de Criterios de Evaluación

Criterio	Rango de Ponderación
Accesibilidad	[0 – 10]
Visibilidad	[0 – 10]
Porcentaje de error	[0 – 7]
Pérdidas de calor	[0 – 5]
Vida útil	[0 – 5]

3.2 Selección de Instrumentación

3.2.1 Evaluación Técnica

Para este aparatado se evaluarán técnicamente en rasgos generales las tres propuestas según los criterios de evaluación mencionados anteriormente. Además, para finalizar con la evaluación se presenta la matriz de priorización.

La propuesta de la Empresa A satisface plenamente los tres primeros criterios de evaluación. La implementación de un sistema de monitoreo local garantizará una accesibilidad integral a todas las mediciones, seleccionando estratégicamente una ubicación que facilite el acceso a la pantalla de visualización. Además, la incorporación de una pantalla táctil con todas las mediciones de la Planta minimizará los errores en el registro de datos, ya que estos serán fácilmente visibles en la pantalla. Sin embargo, persiste un pequeño margen de error, que es totalmente aceptable y representa una mejora sustancial respecto a los porcentajes actuales. Esta mínima incertidumbre se atribuye a la falta de total precisión de los transmisores de presión, aunque estos son considerablemente más precisos que los registros manuales.

El requisito de una minimización en la pérdida de calor no se satisface, dado que la propuesta carece de cualquier forma de aislamiento térmico para la central. Por otro lado, el último criterio debería cumplirse, ya que los instrumentos proceden de una empresa con casi una década de experiencia en el sector, lo que garantiza la fiabilidad total del suministro e implementación. Además, la presencia de una pantalla de monitoreo contribuirá a evitar manipulaciones indebidas de los instrumentos instalados, lo que prolongará su vida útil.

La segunda propuesta cumple los dos primeros criterios, ya que al igual que la anterior se tendrá un registrador digital de las mediciones, por lo que la accesibilidad y visibilidad serán mejores que al registrar datos actualmente. Aunque el porcentaje de error debería disminuir para algunas mediciones, específicamente en donde se instará el flujómetro Vortex, la gran mayoría de variables seguirán teniendo la misma brecha de error, ya que no se instalarán transmisores de presión ni de temperatura para que las mediciones sean más exactas. Además, tampoco cuenta con ningún aislante térmico, por lo que las pérdidas de calor seguirán siendo las mismas. Finalmente, se espera que tenga una extensa vida útil debido a los precedentes de la empresa, sin embargo esta puede ser afectada dependiendo de la manipulación de los equipos.

La tercera y última propuesta cumple los primeros cuatro criterios, los primeros dos debido al registrador digital al igual que la propuesta anterior, obteniendo una mejor accesibilidad y visibilidad de las mediciones, pero esta propuesta si cuenta con transmisores de presión, flujómetros de gas natural, tanto para la caldera y sobrecalentador, termocuplas para los gases de combustión y aparatos que permiten analizar los gases de combustión y rango de humedad, obteniendo mediciones más exactas.

Lo anterior implica un menor porcentaje de error que el actual, por lo que los resultados y aprendizajes por parte de los estudiantes se verán mejorados. Además, esta propuesta es la única que cuenta aislante térmico y trampas de vapor, reduciendo las pérdidas de calor que ocurren en el ciclo, implicando así una mejora al rendimiento y análisis de la Planta, obteniendo mediciones más coherentes en las temperaturas, ayudando a los estudiantes al análisis de mediciones y resultados. Cabe destacar que las trampas de vapor actuales están instaladas desde los principios de la Central.

Por último, la evaluación de vida útil no es aceptable, ya que al ser una propuesta propia y no de una empresa, los instrumentos serían encargados mediante diversas empresas o páginas de internet, por lo que no se tendría una estimación exacta de su durabilidad. Asimismo, al no tener una empresa de respaldo se dificulta la implementación.

Para finalizar, en la Tabla 9 se presenta la matriz de priorización.

Tabla 9: Matriz de Priorización

Criterios - Propuestas	Accesibilidad	Visibilidad	Porcentaje de error	Pérdidas de calor	Vida útil	Total
Empresa A	10	10	6	0	5	31
Empresa B	9	10	3	0	4	26
Propia	9	10	4	3	2	28

A partir de la matriz se concluye que la Empresa A cumple mayormente los criterios de evaluación según la ponderación asignada.

3.2.2 Evaluación Económica

En este apartado se muestran los presupuestos de las 3 propuestas.

1. Presupuesto Empresa A:

Para esta cotización no se tiene un desglose por cada unidad, sólo se tiene el valor neto y total.

Tabla 10: Presupuesto Empresa A

Descripción	Cantidad	Precio [CLP]
Sistema de monitoreo PEM	1	29.676.439
Flujómetro turbina	2	
Flujómetro Vortex	1	
Flujómetro másico térmico	1	
Sensores de temperatura	11	
Transmisores de presión	9	
Transmisores de presión diferencial	2	
Medidor de energía corriente continua	1	
PLC modelo Schneider Modicon Easy M200	1	
Flujómetro mecánico	1	
Válvula de bola modulante	1	
Montaje quemador sobrecalentador	1	
	Precio Neto	29.676.439
	IVA 19%	5.638.523
	Precio Total	35.314.496

Cabe mencionar que en el precio los equipos e instrumentos a instalar viene agregado el precio de su implementación.

2. Presupuesto Empresa B:

Tabla 11: Presupuesto Empresa B

Descripción	Cantidad	Precio [CLP]
Flujómetro Vortex	1	4.348.817
Registrador Digital	1	5.603.175
Instalación y configuración de equipos registradores	1	4.158.900
Instalación de pantalla de visualización de datos	1	
Control de gas para regulación de energía	1	
Capacitación a personal para operación de equipos	1	
	Precio Neto	14.110.892
	IVA 19%	2.681.069
	Precio Total	16.791.961

3. Presupuesto de propuesta propia:

Tabla 12: Presupuesto Propuesta Propia

Descripción	Cantidad	Precio Unit. [CLP]	Precio [CLP]
Flujómetro Vortex	1	4.348.817	4.348.817
Registrador Digital	1	5.603.175	5.603.175
Flujómetro másico térmico	2	498.962	997.384
Termocupla para gases de combustión	2	59.800	119.600
Analizador de gases	1	1.014.308	1.014.308
Transmisor de presión	8	100.997	807.976
Psicómetro	1	105.794	105.794
Trampa de vapor tipo balde invertido	4	337.348	1.349.392
Válvula de bola tipo High Performance	6	101.308	607.848
Filtro Y de partículas FIG12	2	67.890	135.780
Válvula globo con fuelle	6	320.831	1.924.986
Filtro Y de partículas FIG14HP	2	130.802	261.604
Aislante Térmico 50x1200x15000 mm	1	30.990	30.990
Implementación de equipos y montaje de quemador	1	6.000.000	6.000.000
		Precio Neto	23.307.654
		IVA 19%	4.428.454
		Precio Total	27.736.108

Cabe señalar que el desglose de equipos se encuentra en el Anexo D, en donde se utilizaron los mismos precios que la propuesta anterior para el flujómetro Vortex y el registrador digital, además, el precio de la implementación y montaje de equipos y quemador de sobrecalentador fue un precio aproximado desde la propuesta de la Empresa B, aumentando su valor debido a que se deben implementar más productos.

3.3 Discusión de Resultados

Luego de evaluar técnicamente las propuestas en función de los criterios mencionados en el punto 3.1.2, realizar una matriz de priorización y visualizar la evaluación económica, se concluye que la propuesta de la Empresa A es la más factible para implementar, debido a que cumple la mayoría de los criterios de evaluación y obtiene la mayor ponderación en la matriz de evaluación, además, su precio es aceptable en medida a lo que se suministrará e implementará.

Dicha propuesta cuenta con lo principal para tener una mejor accesibilidad y visibilidad de mediciones, el sistema de monitoreo, efectuando un registro de datos más cómodo para los estudiantes de la Universidad. Además, al instalarse instrumentos de medición más actuales y transmisores tanto de presión como de temperaturas que lleven estas mediciones a la pantalla principal se reducirá el porcentaje de error, mejorando, estimulando y promoviendo el aprendizaje de los alumnos de una manera más eficaz, lo cual es primordial para su desarrollo profesional.

La segunda propuesta fue rechazada debido a que sus términos no están completamente claros y se involucran dos empresas en la realización del proyecto, lo cual lo hace más complicado. Además, esta propuesta es la que cumple con menos criterios de evaluación, especialmente el tercero, que es crucial para este proyecto, ya que reducir las brechas de error es fundamental para la enseñanza efectiva de los alumnos.

La tercera propuesta cumple con la mayoría de los criterios, y el precio total es similar a la propuesta elegida, pero no se tiene claridad de la empresa que realice el proceso de instalación de productos y además estos no serían comprados a una misma empresa, sino por 6 empresas y/o páginas de internet diferentes, dificultando la compra y aumentando los tiempos de espera por los envíos de los equipos. Cabe destacar que algunos instrumentos mencionados en esta propuesta pueden ser implementados más adelante por otra empresa, siendo esta una instancia que ayude a la actualización de los componentes actuales, como los sistemas de trampas de vapor, las cuales llevan instaladas por más de 50 años, desde que se inició el proyecto de la Planta de Vapor.

Finalmente, luego de la implementación se corroborarán los criterios de evaluación mediante una encuesta de satisfacción, la cual se pondrá a disposición de estudiantes que estén cursando los ramos relacionados a termofluidos (Termodinámica, Termodinámica Aplicada y Centrales de Energía). Además, se espera que la encuesta también pueda ser respondida por parte de alumnos antiguos que hayan cursado estas asignaturas, obteniendo una mayor cantidad de respuestas para poder realizar una mejor discusión sobre los resultados luego de la implementación.

Capítulo 4: Implementación

4.1 Instrumentación Implementada

Finalmente, la implementación de equipos e instrumentos de medición fue la siguiente:

- Desarrollo e implementación de un sistema local con pantalla táctil de medición de variables de operación.
- 1 Flujómetro Vortex para vapor sobrecalentado.
- 1 Flujómetro másico térmico para gas natural.
- 13 Transmisores de temperatura.
- 5 Transmisores de presión.
- 5 Transmisores de presión diferencial.
- 1 Medidor de energía corriente continua del flujo de gas mediante una válvula modulante de quemador del sobrecalentador.
- 2 Flujómetro mecánico con salida de pulsos para medición de agua de refrigeración y agua caliente.
- Montaje de quemador a gas natural para sobrecalentador.
- 1 Válvula de control modulante para línea de gas natural a quemador de sobrecalentador
- 1 Válvula de compuerta que regula el caudal hacia el desaireador.
- 1 Transmisor e indicador de nivel.

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo de la implementación, en donde se proyecta la ubicación de los instrumentos de medición, de los cuales se transmite hacia el tablero de monitoreo.

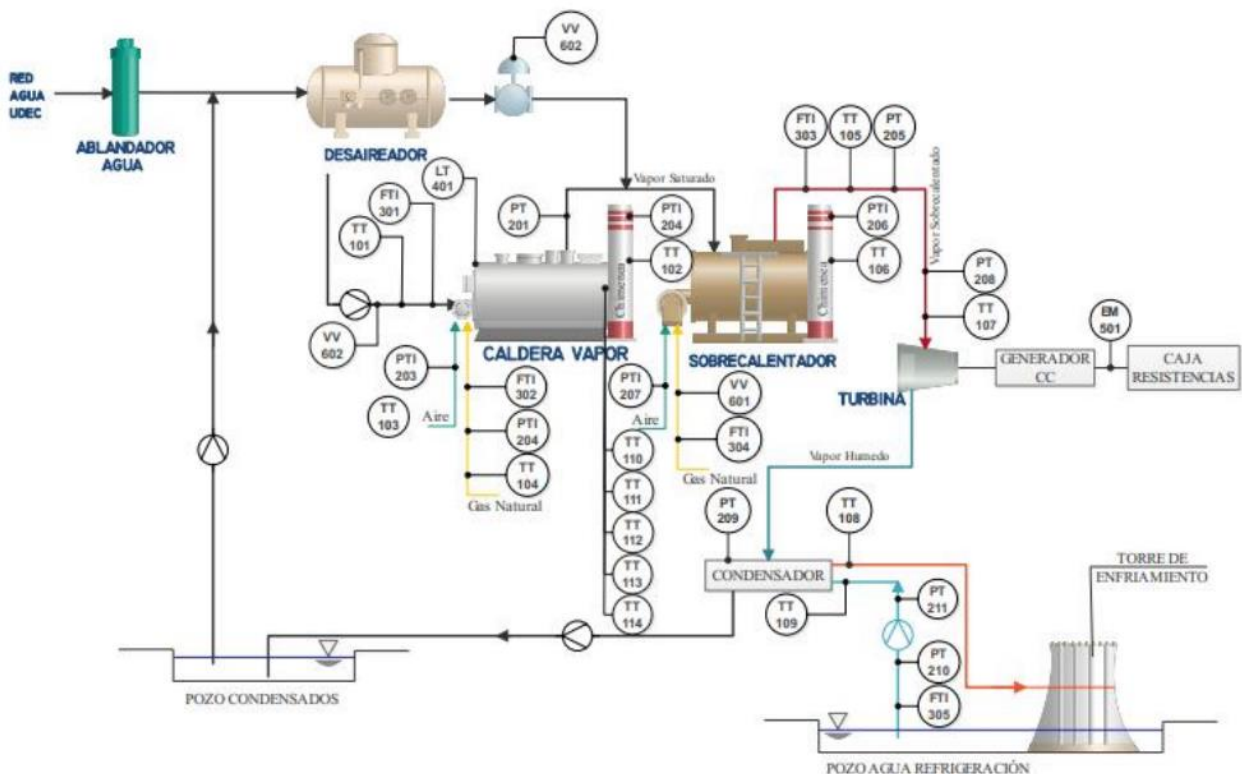


Figura 4.1: Diagrama de Flujo de la Implementación [Empresa 1]

En la Tabla 13 se encuentra el glosario del diagrama de flujo mostrado anteriormente.

Tabla 13: Glosario Diagrama de Flujo

Abreviatura	Descripción
LT	Transmisor de Nivel
FTI	Transmisor e Indicador de Flujo
TT	Transmisor de Temperatura
PT	Transmisor de Presión
EM	Medidor de Energía
VV	Válvula
PTI	Transmisor e Indicador de Presión

A continuación, en la Tabla 14 se visualizan las características nominales de los equipos e instrumentos de medición implementados:

Tabla 14: Características Nominales de la Instrumentación

Marca	Modelo	Rango	Alimentación	Señal Salida	Exactitud
Transmisores de Presión (5)					
SENDO	SS302	0 – 10 bar	12 – 36 VDC	4 – 20 mA	± 0,5 %
SENDO	SS312	-1 – 0,6 bar	12 – 36 VDC	4 – 20 mA	± 1 %
Transmisores de Presión Diferencial (5)					
TEREN	DPT321	0 – 1000 Pa	18,5 – 35 VDC	4 – 20 mA	± 1 %
Válvula Modulante Sobrecalentador					
FOLS	STQE-05EX	N.A.	24 VDC	4 – 20 mA	N.A.
Flujómetro Másico Térmico para Gas Natural					
Anhui Jujie Automation Technology Co. Ltd.	GTTMF-25F	0,85 – 100 Nm ³ /h	24 VDC	4 – 20 mA	± 1 %
Analizador Energía Corriente Continua					
Acrel Co. Ltd.	PZ72L-DE	0 – 50 A	20 – 60 VDC	4 – 20 mA	± 0,5 %
PLC					
Schneider Electric	M200	N.A.	24 VDC	4 – 20 mA	N.A.
Flujómetro Mecánico con Salida de Pulsos para Agua de Refrigeración					
Endress+Hauser	Program 10P	4 dm ³ /min – 9.600 m ³ /h	11 – 40 VDC	4 – 20 mA	± 0,5 %
Flujómetro Vortex					
Supmea Automation Co. Ltd.	LWGY-SUP-DN40	N.A.	24 VDC	4 – 20 mA	± 1 %

Transmisores de Temperatura (13)					
MaxWell	TT-210/ TT-500	-200 – 850 °C	12-35 VDC	4 – 20 mA	± 0,2 %
Válvula de Compuerta para Alimentación Desaireador					
Winner	WVA32-2	N.A.	24 VAC	4 – 20 mA	N.A.
Flujómetro Mecánico con Salida de Pulsos para Desaireador					
APATOR	JS130	N.A.	24 VDC	4 – 20 mA	± 3 %

4.2 Análisis de Error

4.2.1 Mediciones Utilizadas

Debido al retraso de las pruebas para realizar la puesta en marcha de la Planta a Vapor, se utilizarán las mediciones registradas el año 2018 para el análisis de error, vinculando las exactitudes de los nuevos instrumentos a las mediciones antiguas.

En la Tabla 15 se visualizan las mediciones a utilizar, con su respectiva exactitud.

Tabla 15: Mediciones Utilizadas

Variable		Valor	Exactitud	Error Asociado
Caldera				
$T_{w,1}$	Temperatura de entrada del agua, °C	84,9	± 0,2 %	± 0,2 °C
$T_{v,2}$	Temperatura de salida del vapor, °C	163,4	± 0,2 %	± 0,3 °C
$P_{w,1}$	Presión de trabajo, kPa (Abs)	681,2	± 0,5 %	± 3,4 kPa
$P_{v,2}$	Presión de salida del vapor, kPa (Abs)	661,4	± 0,5 %	± 3,3 kPa
\dot{V}_C	Flujo volumétrico, m ³ /s ($\cdot 10^{-3}$)	3,5	± 1 %	-
Sobrecalentador				
$T_{v,4,sc}$	Temperatura de vapor a la salida, °C	247,7	± 0,2 %	± 0,5 °C
$P_{v,3}$	Presión a la entrada, kPa (Abs)	661,4	± 0,5 %	± 3,3 kPa
$P_{v,4,sc}$	Presión a la salida, kPa (Abs)	681,2	± 0,5 %	± 3,4 kPa
\dot{m}_{GN}	Flujo másico, kg/s ($\cdot 10^{-4}$)	2,6	± 1 %	-
Turbina				
$T_{v,4,t}$	Temperatura del vapor entrada, °C	231	± 0,2 %	± 0,5 °C
$T_{v,5}$	Temperatura del vapor a la salida, °C	86,3	± 0,2 %	± 0,2 °C
$P_{v,4,t}$	Presión del vapor entrada, kPa (Abs)	681,2	± 0,5 %	± 3,4 kPa
$P_{v,5}$	Presión del vapor salida, kPa (Abs)	14,4	± 1 %	± 0,1 kPa
Generador				
V	Voltaje, V	170,7	± 0,5 %	± 0,9 V
A	Intensidad, A	23,1	± 0,5 %	± 0,1 A
ω	Velocidad angular, rad/s	290,2	N.A.	-
F_{freno}	Fuerza de frenado, N	56,9	N.A.	-

Condensador				
$T_{w,6}$	Temperatura del agua a la salida, °C	25	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
$P_{w,6}$	Presión a la salida, kPa (Abs)	7,3	$\pm 1 \%$	$\pm 0,1 \text{ kPa}$
Torre de Enfriamiento				
$T_{w,11}$	Temperatura del agua a la entrada, °C	19,6	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_{w,14}$	Temperatura del agua a la salida, °C	16	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
Desaireador				
$P_{v,8}$	Presión de vapor, kPa	130	N.A.	-

En los casos donde No Aplica, se utilizarán las incertidumbres antiguas.

4.2.2 Recopilación Resultados

En la Tabla 16 se muestran los resultados obtenidos con sus respectivos errores.

Tabla 16: Resultados

Variable	Resultado
Caldera	
$\dot{Q}_{\text{útil}}$, kW	$97,54 \pm 0,05$
η_{cald} , %	$79,55 \pm 0,04$
Sobrecalentador	
\dot{Q}_{sob} , kW	$6,73 \pm 0,05$
η_{sob} , %	$73,05 \pm 0,53$
Turbina	
\dot{W}_{turb} , kW	$9,14 \pm 0,04$
η_{turb} , %	$39,70 \pm 0,18$
Generador	
N_{eje} , kW	$5,12 \pm 0,10$
N_e , kW	$3,94 \pm 0,03$
η_g , %	$77,03 \pm 1,60$
Condensador	
\dot{Q}_{cond} , kW	$92,39 \pm 0,02$
Ciclo Planta de Vapor	
η_{ciclo} , %	$3,98 \pm 0,02$

4.2.3 Análisis de Resultados

En la siguiente Figura se presenta un gráfico que compara los errores asociados a los resultados entre la instrumentación antigua y la actual.

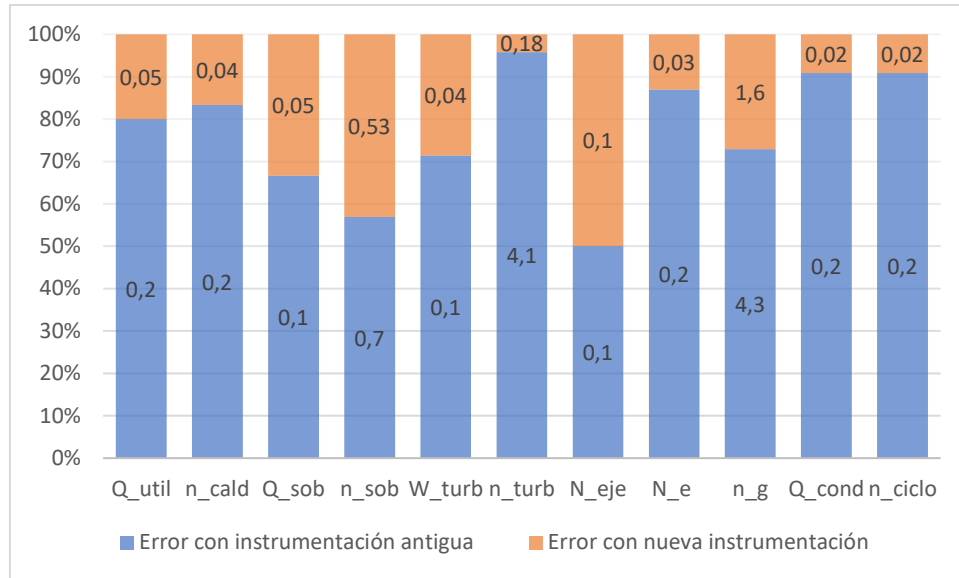


Figura 4.2: Gráfico Comparativo de Errores Año 2018

De la Figura anterior se observa a simple vista una significativa diferencia entre los errores con la instrumentación antigua y la nueva, llegando a disminuir hasta el 10% del valor original en el error del rendimiento total del ciclo. Esto se debe principalmente a la precisión del analizador de corriente, el cual transmite los valores del voltaje e intensidad con gran exactitud y los cuales influyen directamente en la potencia eléctrica.

El error que más disminuyó está relacionado con el rendimiento de la turbina, llegando a disminuir en un 95% el valor del error inicial, debido a que las exactitudes de medición de presión aumentaron, específicamente a la salida de la turbina, dado que la incertidumbre antigua de esta variable superaba el valor medido.

Por otro lado, el margen de error de la potencia al eje no varía, dado que esta depende directamente de la fuerza de frenado y la velocidad angular, y los instrumentos de medición de estas variables no fueron actualizados.

A pesar de que los resultados de calores transferidos y rendimientos de la Planta a Vapor no varían, ya que se utilizaron las mismas mediciones que el año 2018, estas deberían ser más precisas en el futuro.

Es importante destacar que en un futuro se deben implementar nuevos instrumentos de medición para la fuerza de frenado y la velocidad angular, los cuales quedaron exentos en esta modernización.

4.3 Encuesta de Satisfacción

En este apartado se realizó una encuesta de satisfacción dirigida a los estudiantes que hayan cursado alguna de las asignaturas asociadas a Termofluidos, con la finalidad de recopilar información y llevar a cabo una retroalimentación para trabajos futuros. La encuesta fue difundida a través de plataformas digitales para obtener un mayor alcance.

4.3.1 Criterios de Evaluación

Para medir el nivel de satisfacción se utilizó una escala entre 0 y 7, siendo 0 un nivel totalmente en desacuerdo y 7 totalmente de acuerdo. La encuesta abordará criterios de evaluación como la accesibilidad, visibilidad, precisión, comprensión, impacto en el aprendizaje, integración de tecnología avanzada y motivación.

Las preguntas realizadas en la encuesta son las siguientes:

1. Año de ingreso.
2. ¿Considera que la experiencia actual de Laboratorio en Planta de Vapor contribuye en el aprendizaje de conceptos relacionados al área de Termofluidos?
3. ¿Cuál de los siguientes instrumentos ha utilizado en el Laboratorio de Termofluidos?
4. ¿Ha tenido alguna dificultad o limitación para acceder o visualizar los instrumentos de medición?
5. ¿Considera que la resolución de los instrumentos actuales es suficiente para realizar las experiencias de Laboratorio?
6. ¿Cuál es su preferencia con relación a la adquisición de datos en el Laboratorio? (Manual con instrumento análogo, manual con instrumento digital, automático con instrumento digital)
7. ¿Encuentra útil la presentación visual de las variables experimentales en el sistema local?
8. ¿Crees que con la modernización de la Planta mejorará el proceso enseñanza-aprendizaje?
9. ¿Considera que la información mostrada en el sistema local es clara y fácil de interpretar?
10. ¿Crees que las mediciones más precisas y la visualización de datos contribuirán a una mejor comprensión de los conceptos teóricos?
11. ¿Considera que los nuevos instrumentos y visualizaciones facilitan su comprensión del ciclo de vapor?
12. ¿Se siente más motivado para participar activamente en las experiencias de Laboratorio de la Planta a Vapor con la nueva implementación?
13. ¿Hay algún aspecto específico que considere necesario ajustar o agregar para optimizar el aprendizaje práctico?

4.3.2 Recopilación de Resultados

A continuación se presenta un resumen de los resultados de las 27 respuestas obtenidas a partir de la encuesta. Las respuestas en detalle se encuentran en el Anexo E.

1. En la siguiente Tabla se muestran los años de ingreso de los encuestados:

Tabla 17: Años de Ingreso

Año de Ingreso	2016	2017	2018	2019	2020	2022
Cantidad	1	10	2	9	4	1

2. El 78% de los encuestados considera que está de acuerdo o muy de acuerdo que las experiencias de laboratorio contribuyen en el aprendizaje de conceptos relacionados al área de Termofluidos.

3. En la siguiente Figura se muestran los resultados sobre la utilización de los instrumentos de medición.

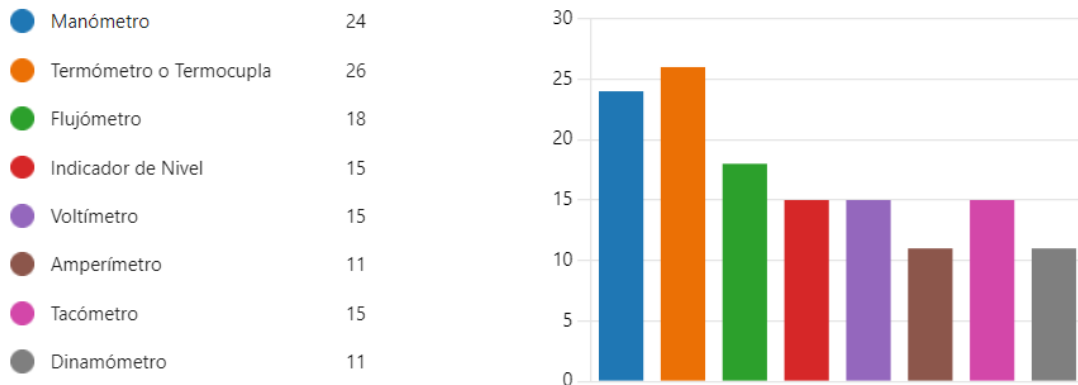


Figura 4.3: Resultados Encuesta, Pregunta 3

El 59% de los encuestados no ha utilizado los instrumentos de medición como amperímetro y dinamómetro en el Laboratorio de Termofluidos.

4. El 48 % de los encuestados ha tenido dificultades o limitaciones para acceder o visualizar la instrumentación.

5. El 53% de los encuestados no está conforme con la resolución de los instrumentos actuales.

6. Con respecto a la preferencia sobre la adquisición de datos se tiene que el 37% prefiere mediciones manuales con instrumentos análogos, el 33% prefiere mediciones manuales con instrumentos digitales y el 30% prefiere mediciones automáticas con instrumentos digitales.

7. El 89% de los encuestados encuentra útil la presentación visual de las variables.

8. El 78% considera que la información mostrada en el sistema local es clara y fácil de interpretar.

9. El 81% cree que la modernización de la Central mejorará el proceso enseñanza-aprendizaje.

10. El 67% considera que las mediciones más precisas contribuirán a una mejor comprensión de conceptos teóricos.

11. El 74% considera que los nuevos instrumentos y visualizaciones facilitan su comprensión del ciclo de vapor.

12. El 89% se siente más motivado en participar en las actividades de la Planta de Vapor gracias a la nueva implementación.

13. Entre las respuestas más destacadas sobre algún aspecto específico que consideren necesario ajustar o agregar para optimizar el aprendizaje práctico se encuentran:

- Presentación visual impresa en el Laboratorio.
- Animación que represente el ciclo.
- Cambio de instrumentos de medición actuales, ya que se necesita de mayor precisión para obtener resultados de cálculo coherentes.
- Mantenimiento y reparación de equipos.
- Hay que aclarar el ciclo de la caldera, junto con sobrecalentador y desaireador consta de on-off, he visto a varios estudiantes equivocarse en lo anterior, midiendo únicamente el ciclo on.
- Manómetros con mejor resolución.
- Calibración de instrumentos.
- Mejores instrumentos de medición, monitoreo digital a tiempo real de los procesos internos en los equipos.
- Ajustar el número de personas al momento de realizar las mediciones, ya que algunas veces no se logran apreciar las mediciones o el procedimiento.

4.4 Discusión de Resultados

De acuerdo con las respuestas anteriores, el 93% de los encuestados ingresó a la carrera entre los años 2017 y 2020. En primera instancia, se evidencia que las experiencias de Laboratorio son valoradas de manera positiva y son consideradas como beneficiosas para el proceso de aprendizaje. Sin embargo, existe un elevado porcentaje (48%) que ha experimentado dificultades o limitaciones para acceder o visualizar los instrumentos de medición, lo cual tiene un impacto negativo en la experiencia de aprendizaje. Además, más de la mitad de los encuestados no están de acuerdo con la resolución de los instrumentos, lo cual requiere mejorar la calidad y precisión de la instrumentación para satisfacer las expectativas de los estudiantes y asegurar resultados fiables en las prácticas de laboratorio.

Según los encuestados, aproximadamente el 44% no ha utilizado instrumentos de medición relacionados con el circuito de generación. Por lo tanto, es fundamental recomendar una retroalimentación a la asignatura de Mediciones, para reducir los tiempos y problemas de medición, ya que si no los han utilizado, pueden causar un atraso innecesario.

La distribución de preferencias con relación al método de adquisición de datos revela una diversidad de opiniones entre los encuestados, por lo que se sugiere la aplicación de las tres formas para satisfacer las necesidades y preferencias individuales de los estudiantes.

Las mejoras implementadas, tales como la presentación visual de variables y la precisión de los nuevos instrumentos de medición, han sido percibidas de manera satisfactoria por los encuestados, dado que aproximadamente el 80% de los encuestados están conformes con la información presentada en el sistema local, y consideran que las mediciones más precisas contribuirán a una mejor comprensión de los conceptos teóricos.

Por último, el 90% de los encuestados se encuentra más motivado para participar en las próximas experiencias de Laboratorio debido a la implementación. Asimismo, se satisfacen la mayoría de las necesidades planteadas por los encuestados. No obstante, se recomienda enfatizar la enseñanza del ciclo on-off del circuito de humos y la reducción de estudiantes por estación.

Capítulo 5: Protocolos de Ensayo

5.1 Recopilación de Experiencias

Para este apartado se llevó a cabo una recopilación de experiencias y opiniones de los profesores que realizan actividades en el Laboratorio de Termofluidos. Luego, las experiencias de laboratorio son representadas mediante un esquema basado en la taxonomía de Bloom, en donde se identifican los niveles mediante los colores mostrados en la siguiente Figura.

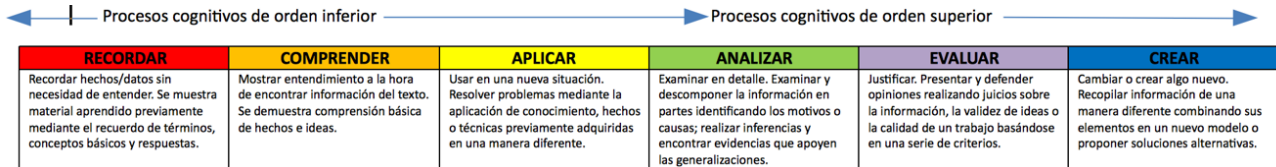


Figura 5.1: Niveles de la Taxonomía de Bloom

5.1.1 Asignatura de Introducción a la Ingeniería Mecánica

La asignatura inicial que emplea el Laboratorio de Termofluidos en la actualidad es Introducción a la Ingeniería Mecánica a cargo de la Profesora Meylí Valín. La presente asignatura se imparte en el primer año para los estudiantes de Ingeniería Civil Mecánica, quienes comparten las instalaciones de la Central a Vapor con los estudiantes de Ingeniería Civil Química de primer año.

La actividad que se lleva a cabo en la Planta a Vapor se compone de dos partes. La primera se desarrolla con la Central sin funcionar, en la cual se lleva a cabo un recorrido completo del ciclo, detallando el funcionamiento de cada uno de los equipos. La segunda se realiza con la Central funcionando, en donde se identifican las variables relevantes que deben ser evaluadas.

En la actualidad, las mediciones de cada equipo están separadas entre sí. Por consiguiente, al contar con un alumno distinto para cada medición, cada individuo introduce un error nuevo de medición, lo que incrementa el error total. Con las mejoras implementadas, este error sería eliminado, lo que se traduce en que el error estaría asociado únicamente a la incertidumbre de cada instrumento de medición. Además de alcanzar una modernización para obtener resultados más precisos, la actualización general de la Planta contribuiría a la experiencia del alumno, asemejándose cada vez más a un caso real.

A continuación se presenta un esquema basado en la taxonomía de Bloom con el progreso en la actividad realizada en la asignatura.

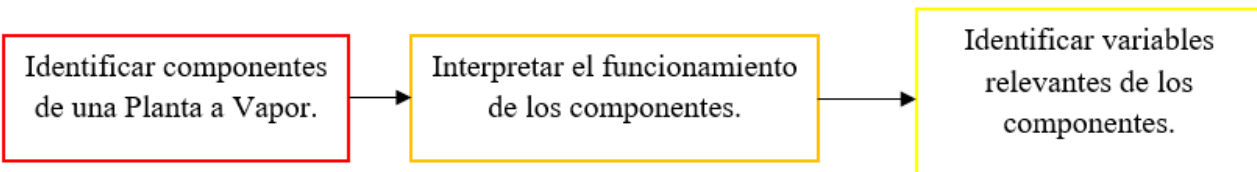


Figura 5.2: Protocolo de Ensayo Introducción a la Ing. Mecánica

Cabe destacar que no se alcanzan a cumplir todos los niveles de la taxonomía de Bloom debido al bajo nivel complejidad de la asignatura.

5.1.2 Asignatura de Termodinámica

La asignatura de Termodinámica está a cargo de la Profesora Einara Blanco y se imparte en el segundo año de Ingeniería Civil Mecánica.

En la asignatura se realiza una actividad de laboratorio vinculada a la Planta de Vapor, con el propósito de determinar el rendimiento del ciclo. Para llevar a cabo esta tarea, se requiere plantear y aplicar la equivalencia de magnitudes de energía de diferente naturaleza, empleando como volumen de control el conjunto turbina-condensador. Se identificarán, además, las transformaciones del fluido de trabajo en diagramas termodinámicos, las irreversibilidades del ciclo y finalmente su rendimiento para el volumen global de la Central de Vapor.

Esta experiencia comienza con un reconocimiento de las instalaciones del laboratorio, en el cual se identificarán los componentes de la Planta y las variables termodinámicas relevantes para el ciclo. A continuación, se les entrega una planilla con las variables experimentales para que puedan determinar los diagramas de transformaciones del agua, identificar las irreversibilidades de la Central y, por último, el rendimiento térmico global de esta.

A pesar de que es una asignatura de nivel básico para la carrera, resulta fundamental la ejecución de este laboratorio, aunque no sea con mediciones tomadas por los alumnos, ya que se trata de la entrada a los cálculos de rendimiento asociados al ciclo, el cual constituye la base para las asignaturas más avanzadas.

A continuación se presenta el esquema basado en la taxonomía de Bloom para el Laboratorio 1 de la asignatura.

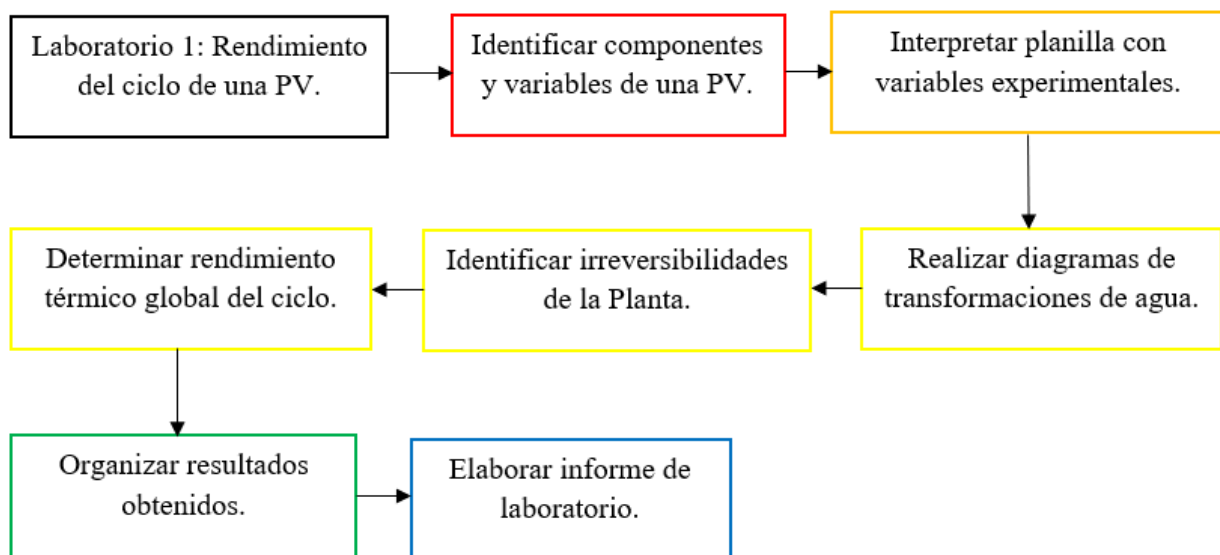


Figura 5.3: Protocolo de Ensayo Termodinámica, Lab. 1

5.1.3 Asignatura de Termodinámica Aplicada

La asignatura Termodinámica Aplicada se imparte a los estudiantes de cuarto año de Ingeniería Civil Mecánica, bajo la gestión del Profesor Cristian Cuevas.

En el transcurso de la asignatura se llevan a cabo dos informes de laboratorio relacionados con la Planta a Vapor (Laboratorio 2 y 4). El primero se encuentra vinculado con la Torre de Enfriamiento, en el cual los estudiantes deberán realizar el balance energético de la Torre y analizarlo mediante unas mediciones proporcionadas por el profesor. El segundo laboratorio se centra en la caracterización de la Planta para establecer sus flujos de energía y rendimientos asociados a cada equipo.

El último laboratorio se desarrolla en tres semanas, en la primera se lleva a cabo un reconocimiento completo de la Central, identificando las variables a evaluar. En la segunda semana se lleva a cabo el ensayo, en donde se hace funcionar la Planta y se realiza el registro de mediciones correspondiente a cada componente. Finalmente, la tercera semana es utilizada para completar el informe.

Es importante destacar que para el registro de datos, el curso se estructura en grupos y se les asigna un sistema a seguir (Caldera, Sobrecalentador, Turbina, entre otros). Por consiguiente, para compartir esta información, se requiere la utilización de plataformas digitales.

En la actualidad, un error habitual entre los estudiantes radica en la medición de flujo, ya que en ocasiones se les ha olvidado registrar el tiempo de las muestras, impidiendo obtener los resultados esperados. Para evitar este error se les sugiere practicar con instrumentos de flujo caseros, tales como el medidor del agua y la luz. Además de fortalecer los conocimientos adquiridos en el ramo de mediciones. Al implementar las mejoras en la Planta se espera obtener resultados más precisos mediante el registro continuo de variables, lo que facilitará el aprendizaje del estudiante, adquiriendo mejores habilidades profesionales.

Para el primer informe de laboratorio de la asignatura asociado a la PV se presenta el siguiente esquema basado en la taxonomía de Bloom.

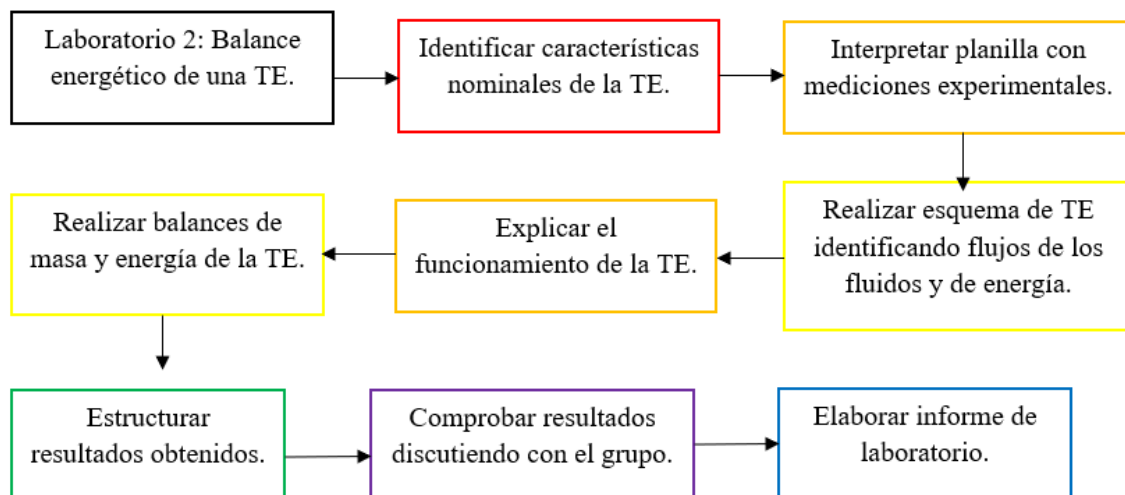


Figura 5.4: Protocolo de Ensayo Termo. Aplicada, Lab. 2

Posteriormente se realiza el último informe de laboratorio relacionado a la PV, el cual se basa en el siguiente esquema.

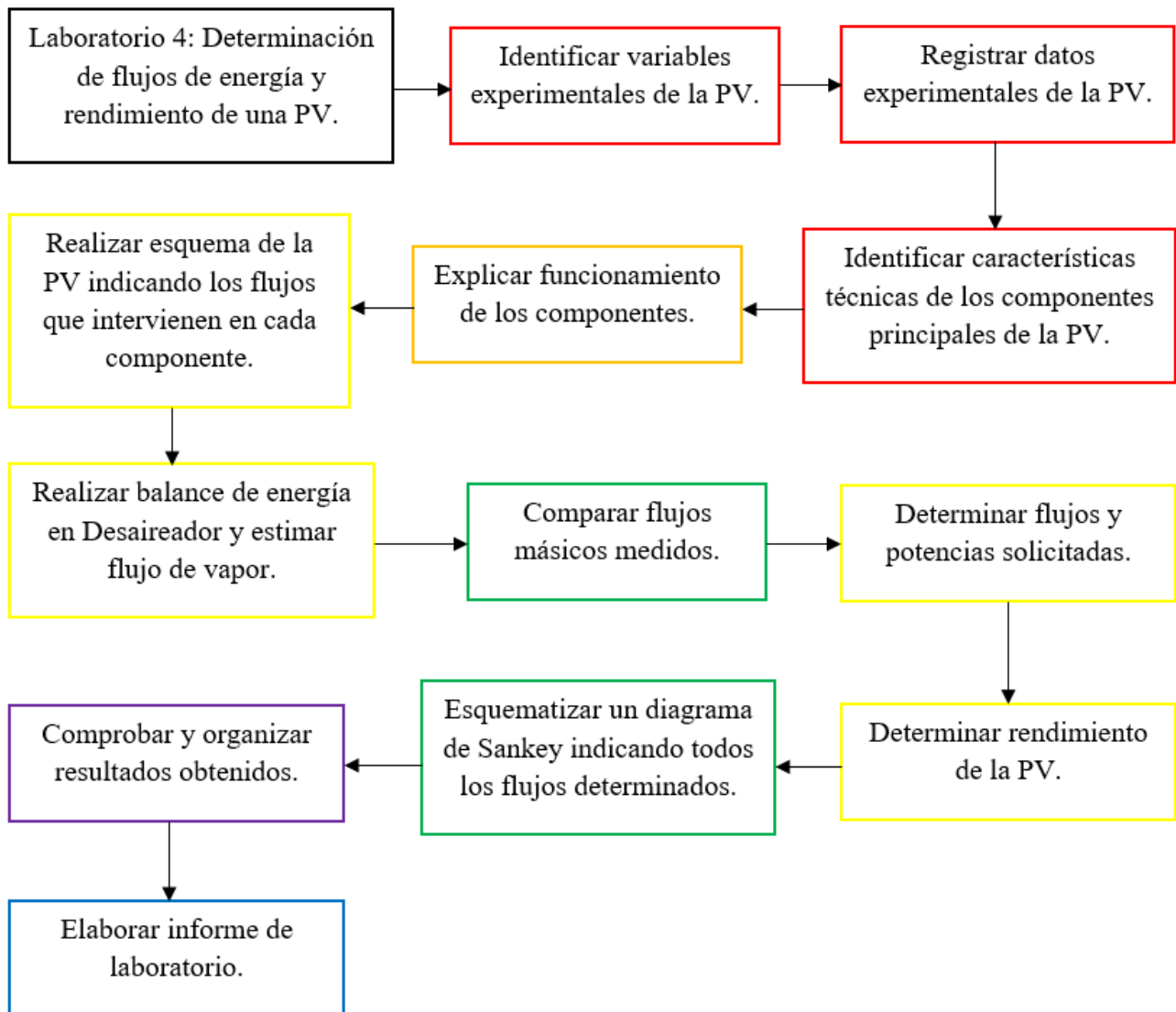


Figura 5.5: Protocolo de Ensayo Termo. Aplicada, Lab. 4

5.1.4 Asignatura de Centrales de Energía

La asignatura más avanzada en lo que respecta al área de termofluidos es Centrales de Energía, la cual se imparte en el quinto año de la carrera y está dirigida por los profesores Óscar Farías y Roberto Ramírez.

El segundo módulo de esta asignatura se encuentra vinculado con las Centrales Térmicas, en el cual se desarrollan tres laboratorios asociados a la Planta de Vapor de la Universidad. El primero consiste en el análisis de la operación actual de la Central, con el fin de identificar los componentes del ciclo, sus sistemas de control y los requisitos legales para una operación segura. Además, se requiere la evaluación del rendimiento de los equipos principales mediante un balance térmico. Por último, se determinarán las irreversibilidades y los costos operacionales de la Planta.

El segundo tiene como objetivo recalculer los resultados de los componentes del circuito de humos de la Central a partir de ecuaciones de combustión, balances de energía y transferencia de calor. Esto con el fin de predecir el comportamiento del ciclo bajo diversas circunstancias de uso de combustible. De igual manera, se requiere examinar los aspectos esenciales de seguridad y medioambientales en la ejecución de los equipos de la Planta, mediante un análisis de la normativa vigente en el país (DS 10).

El tercer y último laboratorio se estructura en dos etapas: la primera consiste en un análisis de bomba centrífuga, el cual tiene el propósito de analizar las diferencias de rendimiento y consumo de potencia con relación al caudal para la operación con estrangulación y la operación con variación de rpm. La segunda etapa se centra en el ensayo de un generador-motor diésel, el cual tiene como objetivo analizar su funcionamiento.

Es importante destacar que el propósito que los tres laboratorios tienen en común es el desarrollo de habilidades relacionadas al trabajo en equipo y el razonamiento crítico.

Las actividades llevadas a cabo en el módulo previamente mencionado siempre presentan errores manuales, tanto al momento de registro de datos como al momento de compartir la información entre los grupos. Este error debería ser eliminado mediante el monitoreo continuo de las variables a través del sistema local, donde se conectarán las variables fundamentales de la operación.

A continuación, se presenta un esquema basado en la taxonomía de Bloom del primer laboratorio de la asignatura.



Figura 5.6: Protocolo de Ensayo Centrales de Energía, Lab. 1

Para el segundo informe de laboratorio relacionado con el circuito de humos se tiene el siguiente esquema (el equipo asignado para este ejemplo será la caldera):

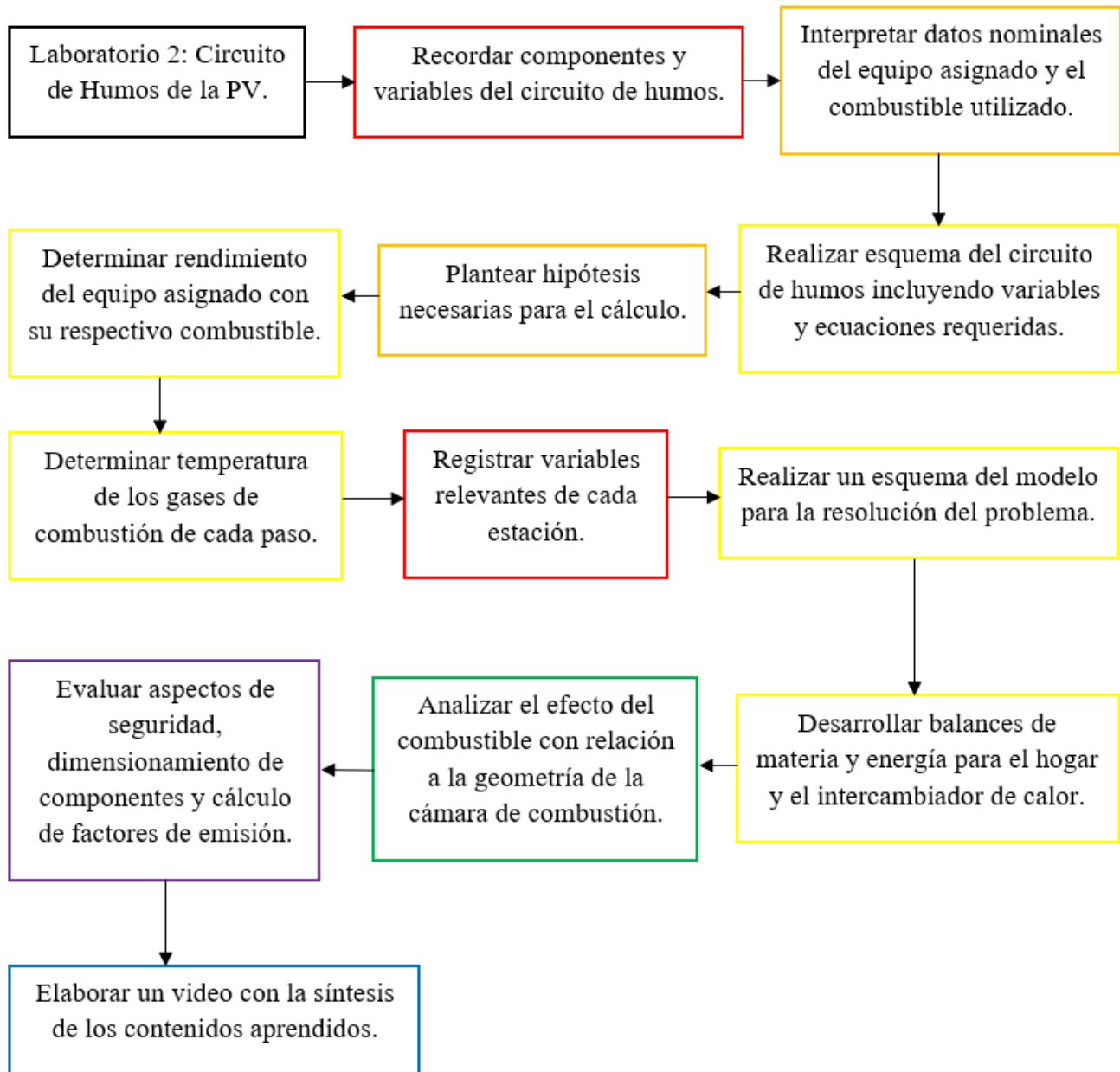


Figura 5.7: Protocolo de Ensayo Centrales de Energía, Lab. 2

A continuación se presentan dos esquemas (Experiencia 1 y 2) asociados al tercer informe de laboratorio, relacionados a las bombas hidráulicas y al generador diésel respectivamente.

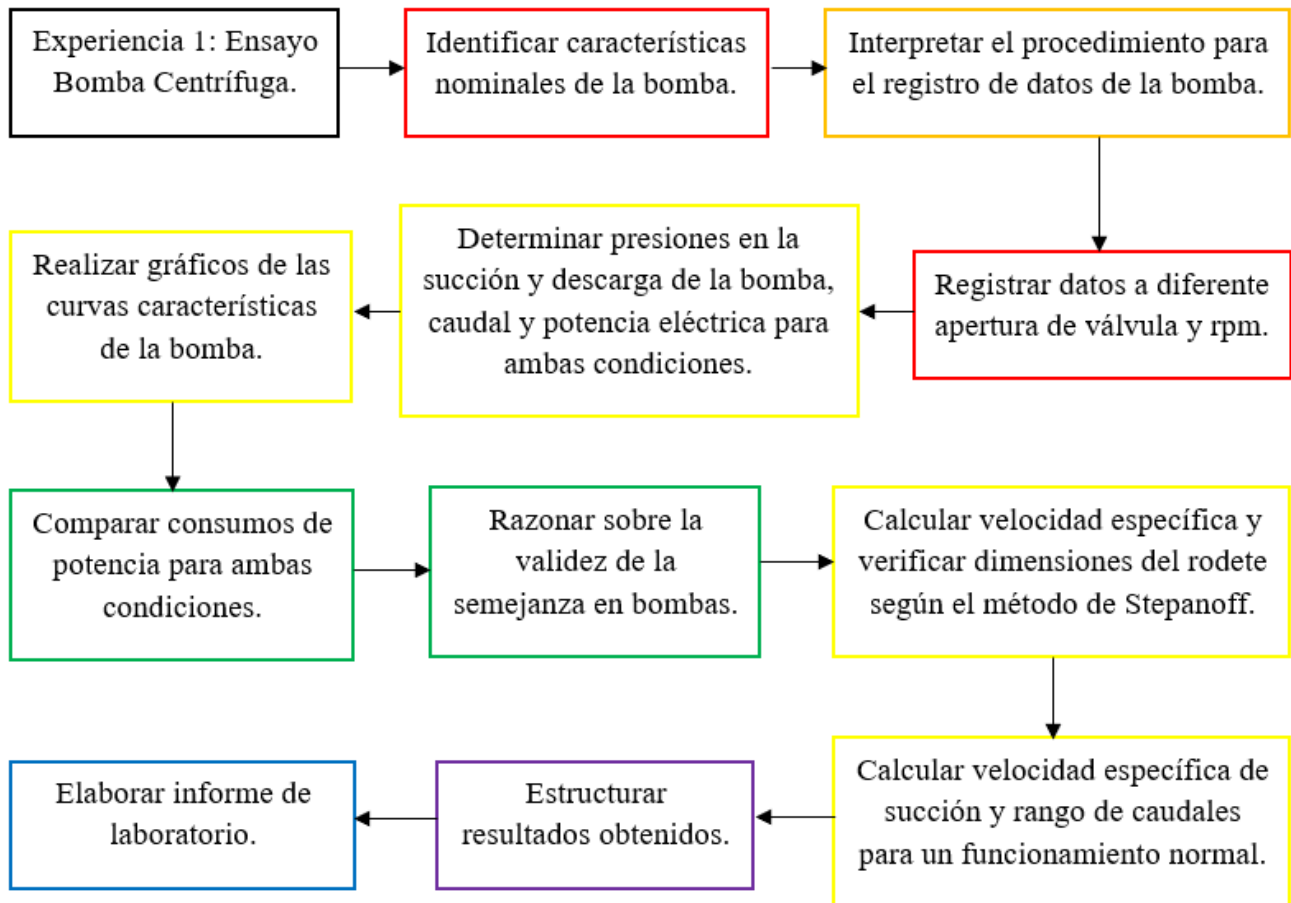


Figura 5.8: Protocolo de Ensayo Centrales de Energía, Experiencia 1

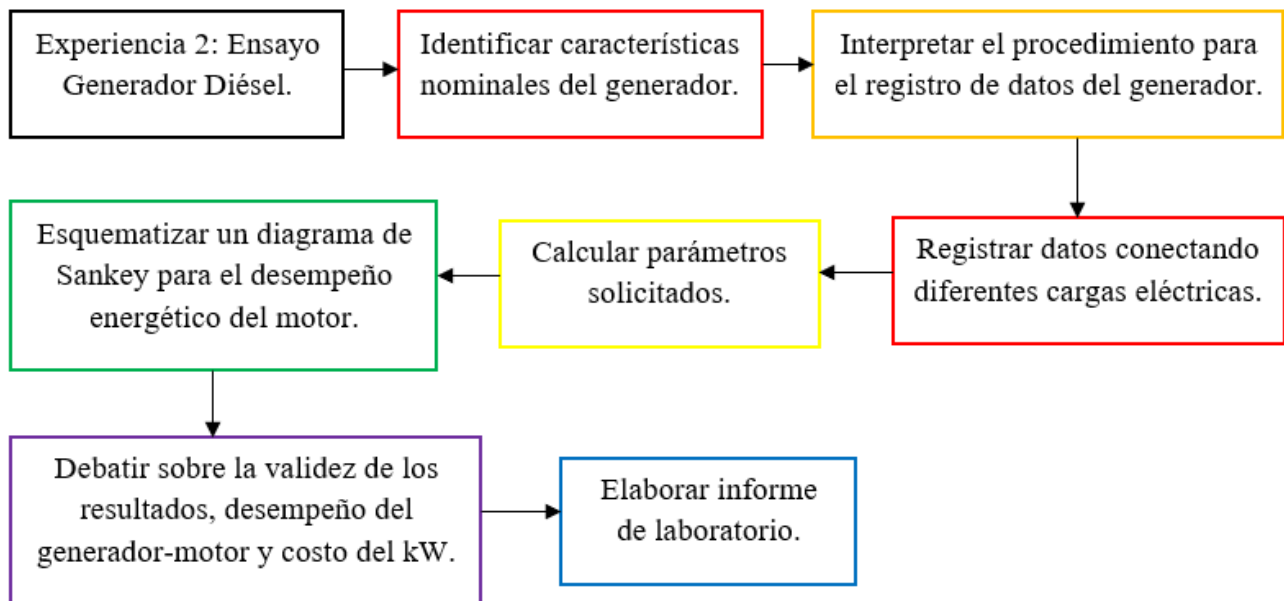


Figura 5.9: Protocolo de Ensayo Centrales de Energía, Experiencia 2

5.2 Planificación de Ensayo para Diferentes Niveles en la Carrera

5.2.1 Resultados de Aprendizaje e Indicadores Claves de Desempeño

En la Tabla 18 se muestran los resultados de aprendizaje asociados al trabajo con sus respectivos indicadores clave de desempeño (KPI) que contribuyen al perfil de egreso de la carrera Ingeniería Civil Mecánica.

Cabe mencionar que los KPI y las competencias de la carrera se describen en el Anexo F.

Tabla 18: Resultados de Aprendizaje y Competencias

N°	Resultado de Aprendizaje	KPIs
Termodinámica		
T1-R1	Conocer los principios fundamentales para identificar los flujos de energía en sistemas abiertos, cerrados y aislados en régimen estacionario y transiente.	1.1, 2.1, 3.1, 3.3, 5.2, 6.1, 7.1, 7.2
T1-R2	Aplicar los principios fundamentales para determinar los flujos de energía en sistemas cerrados estacionario y transiente.	1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 3.1, 3.3, 5.2, 5.3, 6.4, 7.1, 7.2, 7.3
T1-R3	Aplicar análisis exergéticos a sistemas termodinámicos.	1.1, 1.3, 2.1, 3.1, 5.2, 6.1, 6.4, 7.1, 7.2, 7.3
T1-R5	Analizar equipos y sistemas a través de sus transformaciones típicas representadas en los diagramas termodinámicos.	1.1, 1.3, 2.1, 3.1, 3.3, 5.2, 6.1, 6.4, 7.3, 7.4
T1-R6	Aplicar los principios fundamentales para determinar los flujos de energía en sistemas abiertos típicos en régimen estacionario.	1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 3.1, 3.3, 5.2, 5.3, 6.4, 7.1, 7.2, 7.3
Termodinámica Aplicada		
T2-R1	Aplicar la teoría de intercambiadores de calor para determinar las energías intercambiadas por estos.	1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 3.1, 3.3, 5.2, 7.2, 7.3
T2-R4	Aplicar la teoría de ciclos de vapor para determinar variables de operación, realizar análisis exergético, determinar energías intercambiadas en los componentes y en todo el sistema de un ciclo a vapor, y determinar el rendimiento del ciclo.	1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 3.1, 3.3, 5.2, 5.3, 6.4, 7.2, 7.3
Centrales de Energía		
CE-R1	Interpretar políticas y legislación vigente sobre: seguridad, tarifas e impacto ambiental, en el marco central y proyectos energéticos.	2.2, 2.3, 2.4, 4.1, 4.2, 4.3, 5.2, 7.1, 7.2, 7.3, 8.1, 8.2, 8.3
CE-R2	Caracterizar tecnologías y ciclos disponibles para generación de potencia, calor y cogeneración, basadas en el uso de fuentes térmicas, hidráulicas y renovables.	1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 3.1, 5.2, 6.1, 7.1, 7.2, 7.4
CE-R4	Aplicar procedimientos y normas para el cálculo y selección de componentes de centrales de generación y cogeneración.	1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 3.1, 4.3, 5.2,

		5.3, 6.1, 6.2, 6.4, 7.1, 7.2, 7.3 , 7.4
CE-R5	Analizar circuitos de vapor, refrigeración, retorno de condensado, aire y gases de combustión en centrales térmicas.	1.1, 1.2, 1.3, 3.1, 5.2, 5.3, 6.2, 6.4, 7.3, 7.4

Después de identificar los resultados de aprendizaje asociados al Laboratorio de Termofluidos por cada asignatura, se detallan los indicadores clave de desempeño del perfil de egreso de Ingeniería Civil Mecánica. Con esta información se elabora un mapa conceptual que aclara el procedimiento continuo que se lleva a cabo entre las asignaturas, vinculadas con sus KPIs y resultados respectivos.

A continuación se presenta el mapa conceptual mencionado anteriormente; cabe señalar que, por tema de espacio, los resultados de aprendizaje se abreviaron a los números mencionados en la Tabla 18.

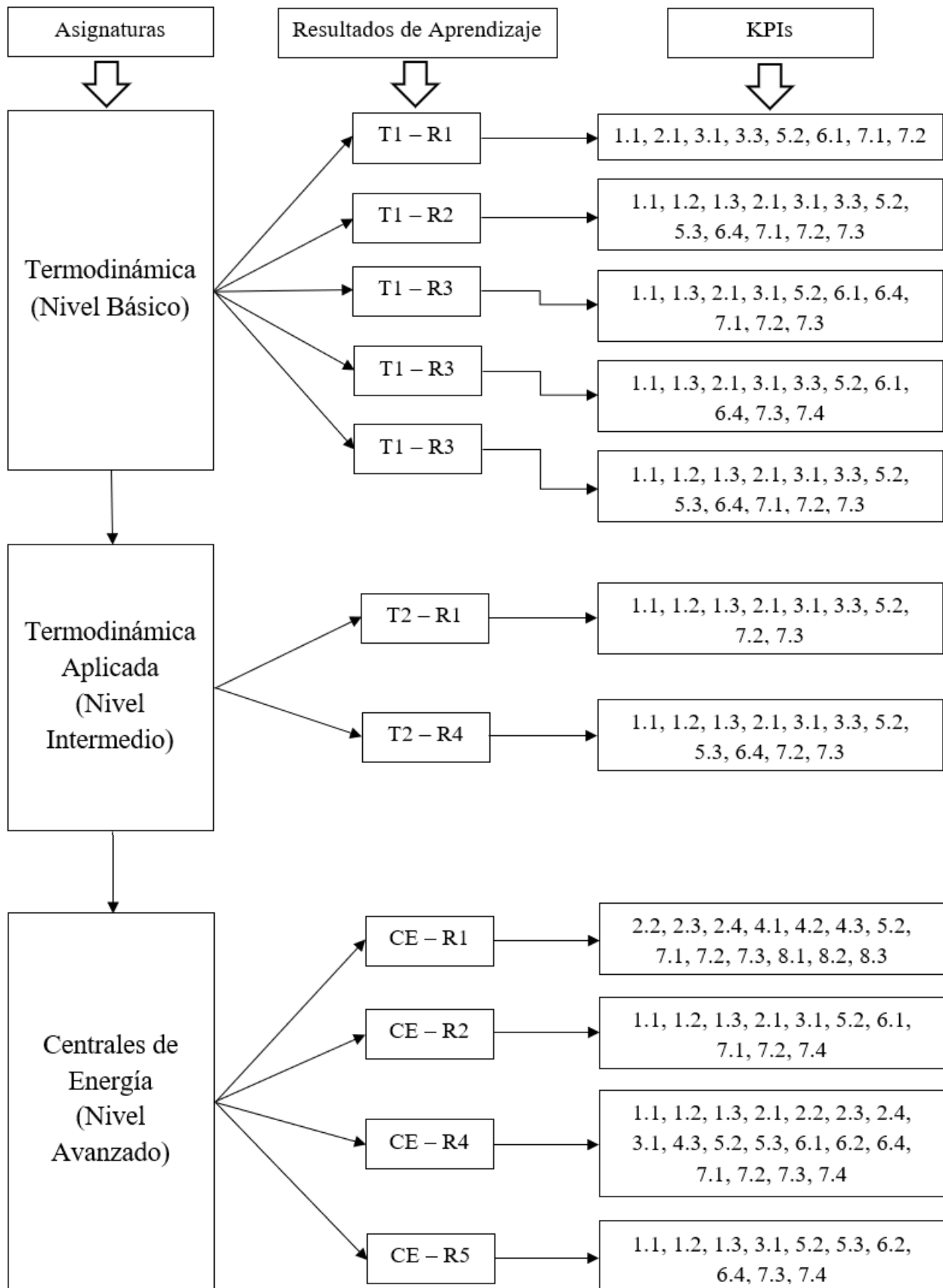


Figura 5.10: Mapa Conceptual de asignaturas relacionadas al área de Termofluidos

5.2.2 Planificación para Nivel Básico

El nivel básico está vinculado con la asignatura de termodinámica, donde se presentan cinco resultados de aprendizaje asociados al área de termodinámica y/o centrales térmicas, los cuales están asociados directamente a una experiencia de laboratorio, explicada en 5.1.2.

A continuación se presenta un esquema relacionando la experiencia de laboratorio con los resultados de aprendizaje, con el objetivo identificar la experiencia con la cual se cumple el resultado de aprendizaje.

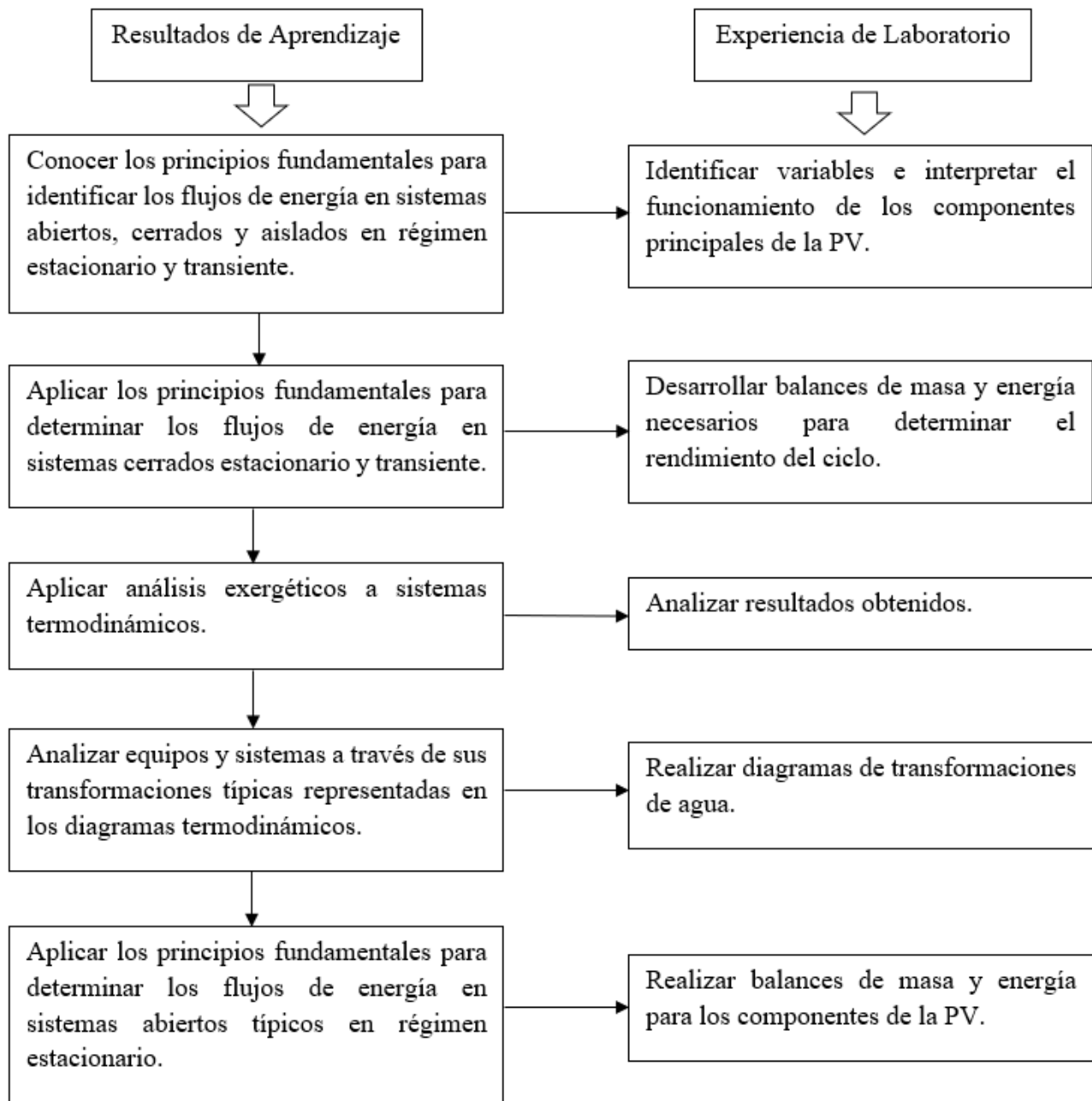


Figura 5.11: Esquema que relaciona experiencias de laboratorio con RA (T1)

5.2.3 Planificación para Nivel Intermedio

En el nivel intermedio, el cual está vinculado con la asignatura Termodinámica Aplicada, se encuentran dos resultados de aprendizajes asociados al área de termofluidos.

A continuación se presenta un esquema mostrando las experiencias de laboratorio realizadas para cumplir cada resultado de aprendizaje.

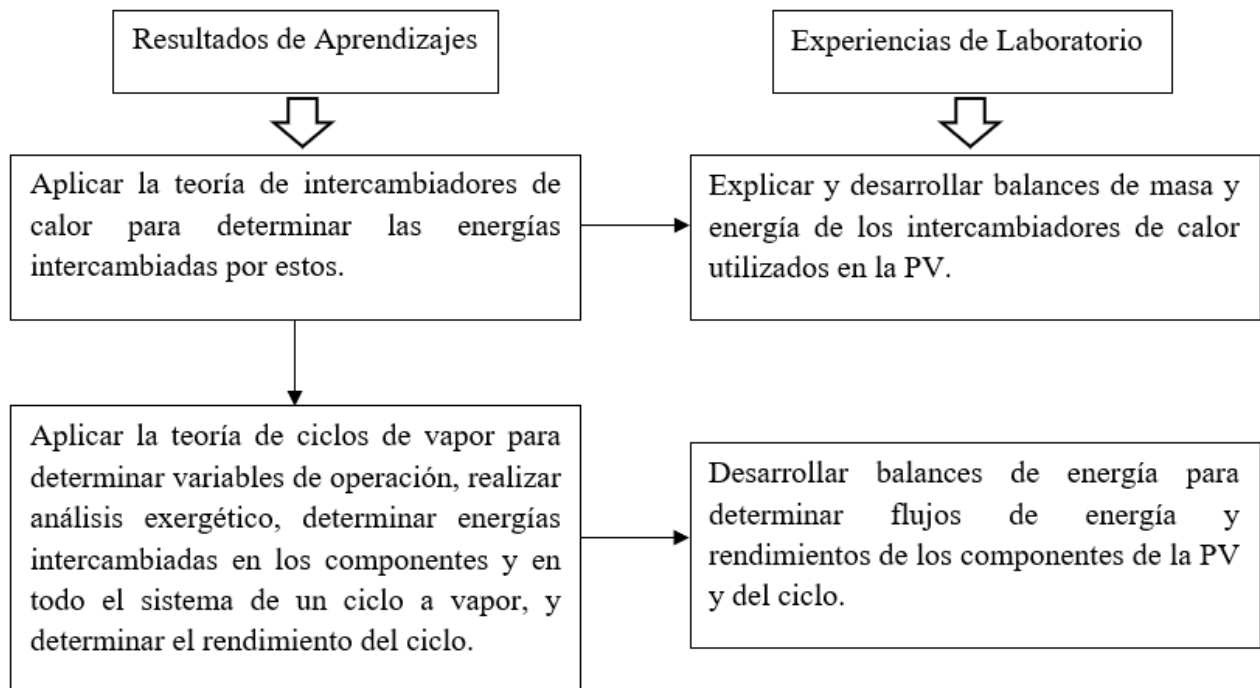


Figura 5.12: Esquema que relaciona experiencias de laboratorio con RA (T2)

5.2.4 Planificación para Nivel Avanzado

El nivel avanzado le corresponde a la asignatura Centrales de Energía, en la cual se encuentran cuatro resultados de aprendizaje vinculados a las centrales térmicas.

En el esquema siguiente se presentan las experiencias realizadas en el laboratorio para cumplir cada resultado de aprendizaje.

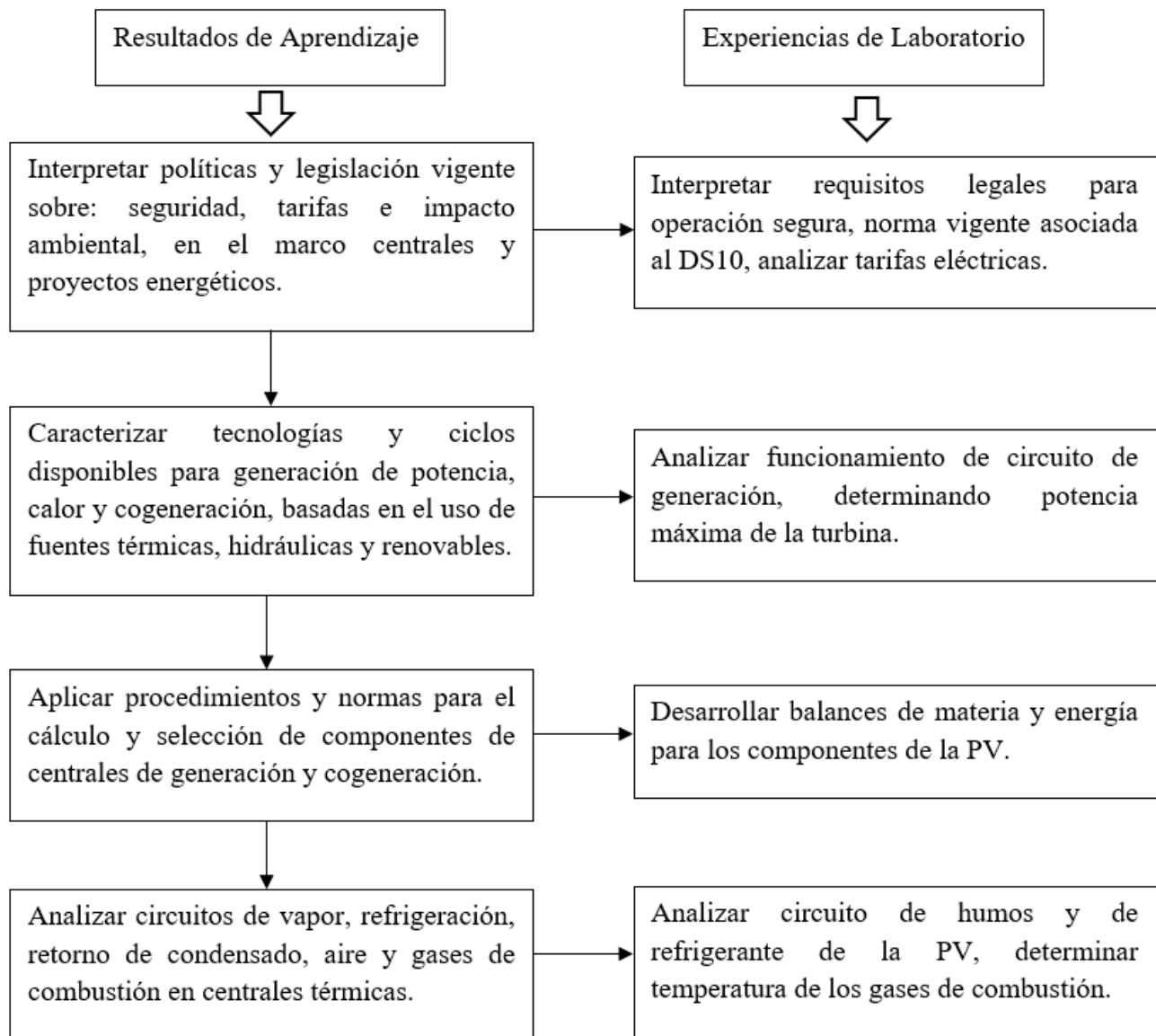


Figura 5.13: Esquema que relaciona experiencias de laboratorio con RA (CE)

5.3 Recomendaciones para la Planificación de Experiencias en el Plan de Estudio

En esta sección se proponen medidas para llevar a cabo en las experiencias de laboratorio, con el fin de realizarlas de manera más eficiente y secuencial.

5.3.1 Asignatura de Termodinámica

En la asignatura de nivel básico se empieza a comprender el funcionamiento de los componentes de la Planta a Vapor, por lo que se debe llegar a un nivel de conocimientos básicos para poder afrontar las siguientes asignaturas de nivel superior con una mayor fluidez en la comprensión de conceptos, dentro los cuales se encontrarían los funcionamientos de cada equipo y las variables relevantes, con esto las siguientes asignaturas no retrasarían sus aprendizajes repasando conocimientos antiguos.

Una manera sencilla de implementar conocimientos básicos hacia los estudiantes es mediante esquemas interpretativos, tanto de cada equipo como de la Planta en general, así se logra un aprendizaje visual y fácil de recordar por parte del estudiante.

A su vez, en este nivel de conocimientos se deben identificar y comprender las normativas para una operación segura, tanto de los operadores de la Central como de los estudiantes.

5.3.2 Asignatura de Termodinámica Aplicada

En esta asignatura de nivel intermedio, se inicia el registro de datos experimentales en el laboratorio para diagnosticar ciertos componentes de la Central. Por consiguiente, es necesario que el estudiante tenga una mínima base de conocimientos para registrar y compartir las variables experimentales de una eficiente y amigable con todo el curso. Por lo que se recomienda realizar un test de diagnóstico para medir el nivel de conocimientos al empezar la asignatura. Además, se requiere un repaso por parte del estudiante al curso previamente cursado de Mediciones, en particular la sección de registro de presiones, temperaturas y flujos.

Implementando esta medida el proceso de registro de datos sería más rápido y no habría problema al visualizar instrumentos de medición con una unidad de medida distinta, lo cual ha provocado problemas en años anteriores.

5.3.3 Asignatura de Centrales de Energía

Para la asignatura de nivel avanzado, una medida a implementar sería omitir el proceso de realización de balances de materia y energía para los componentes de la Planta, ya que estos debieron ser realizados en el curso de nivel intermedio. Por lo que se recomendaría requerir un repaso de dicha asignatura para el desarrollo de las ecuaciones.

Ya que esta es la última asignatura vinculada a las centrales térmicas se recomienda realizar un test de seguridad para asegurarse que todos los estudiantes tengan un nivel óptimo de conocimiento sobre las normas de seguridad de operación.

Capítulo 6: Conclusiones

En primera instancia, se realiza un diagnóstico de la Central, determinando que las brechas de error más elevadas (superando el 5% de error) están relacionadas con la turbina y el generador, dado que poseen una gran incertidumbre para las mediciones registradas, lo cual afecta directamente al rendimiento total del ciclo.

Posteriormente, se implementa la propuesta de la Empresa A, la cual obtuvo la mayor ponderación en la matriz de priorización, invirtiendo un capital de 35.314.496 CLP en instrumentación. Este proceso no solo fomenta el avance tecnológico, sino que también enriquece la experiencia profesional de los estudiantes al brindarles la oportunidad de participar en actividades prácticas similares al ámbito laboral.

A partir del análisis de error se verifica la hipótesis, reduciendo el error del rendimiento del ciclo al 10% de su valor original, y disminuyendo el error en algunos casos hasta un 95%, como en el rendimiento de la turbina. Asimismo, el alumnado percibe una opinión favorable con respecto al monitoreo continuo de variables, ya que el 81% sostiene que la modernización mejorará el proceso de enseñanza-aprendizaje, mientras que el 89% se siente más motivado en participar en las actividades de la Planta de Vapor debido a la nueva implementación.

Finalmente, se diseñaron protocolos de ensayo, constatando que las experiencias de las asignaturas relacionadas con el área de Termofluidos satisfacen la mayor cantidad de niveles de complejidad de la taxonomía de Bloom. Además, contribuyen en todas las competencias y en la mayoría de los indicadores clave de desempeño del perfil de egreso de la carrera.

Referencias

- [1] “Generación Eléctrica en Chile”, Generadoras de Chile, 2021. Recuperado de: <https://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>
- [2] “Energía Térmica”, Generadoras de Chile, 2021. Recuperado de: <https://generadoras.cl/tipos-energia/energia-termica>
- [3] R. Arriagada, M. Serrano, “Informe Consolidado de Emisiones y Trasferencias de Contaminantes 2005-2020”, Ministerio del Medio Ambiente, 2022.
- [4] “Central Térmica Convencional”, Fundación Endesa. Recuperado de: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-electricas-convencionales/central-termica-convencional>
- [5] Jorge Bahamondes, “Análisis Termodinámico de una Turbina de Vapor de Impulso del Laboratorio de Termofluidos”, Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico, 1970.
- [6] Ronald Vilaboa, “Análisis de las Condiciones de Operación del Banco de la Sala de Calderas”, Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico, 1991.
- [7] Ignacio Gómez, “Características del Sistema Turbina a Vapor Fuente Refrigerante del Laboratorio de Termofluidos”, Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico, 1999.
- [8] Ariel Villanueva, “Ensayo Prototipo de la Planta de la Turbina a Vapor del Laboratorio de Termofluidos”, Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico, 2002.
- [9] Luis Bazán, “Rediseño Mecánico de la Caldera de la Planta de Vapor de Termofluidos”, Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico, 2015.
- [10] Emilio Fabres, “Laboratorio Planta de Vapor”, Departamento Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, 2022.
- [11] A. Contreras, H. Gutiérrez, V. Gutiérrez, J. Hernández, P. Ortiz, M. Sepúlveda, “Laboratorio N°1: Planta de Vapor”, Departamento Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, 2023.
- [12] Mauricio González, “Características de la Fuente Refrigerante del Banco de la Turbina a Vapor”, Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico, 2000.
- [13] Oscar Farías, “Laboratorio N°1: Planta de Vapor del Laboratorio de Termofluidos”, Departamento Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, 2018.
- [14] Diego Cortés, “Propuesta de Instrumentación y Sistema de Monitoreo en Línea para la Planta de Vapor del Laboratorio de Termofluidos”, Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico, 2022.

Anexo B: Características Nominales de los Equipos

A continuación se muestran las características nominales de los equipos que conforman la Planta de Vapor del Laboratorio de Termofluidos.

Tabla 19: Características Nominales de la Caldera [14]

Clasificación de presión	Mediana Presión
Marca	INEMI
Tipo de caldera	ESCOCES Igneotubular de 4 pasos
Combustible	Gas Natural
Presión máxima de trabajo	8 kg/cm ² (113.7 psi)
Presión de diseño	10 kg/cm ²
Presión de operación	7 kg/cm ²
Superficie de calefacción	6,5 m ²
Producción de vapor	250 kg/h
Año de fabricación	2017
Número de tubos	54
Equipo de seguridad	Válvula Kunkle tipo resorte 1 ¼
Graduación válvula de seguridad	8,4 kg/cm ²
Calidad del vapor de salida	95 %
Volumen de agua hasta nivel mínimo	1378 litros
Volumen de agua entre nivel máximo y mínimo	18 litros
Volumen cámara de vapor sobre el nivel máx. de agua	56 litros
Altura chimenea	12 m
Diámetro interior chimenea	230 mm

Tabla 20: Características Nominales del Quemador

Marca	SAACKE ROSSPLET s.a.
Modelo	PAG 05
Combustible	Gas Natural
Presión	200 mm.c.a.
Consumo	22 Nm ³ /h

Tabla 21: Características Nominales de la Bomba de Alimentación [9]

Marca	AURORA
Modelo	G5T-BS
Capacidad	22,7 m ³ /h
Velocidad de Giro	1750 RPM
Potencia	2,24 hp

Tabla 22: Características Nominales del Sobrecalentador [9]

Marca	T. SUGDEN Ltd. (Inglaterra)
Modelo	SUDGEN NE 9795, 6H2470
Tipo	Acuotubular SH 2476
Presión Máxima de Vapor	10,34 x 10 ⁵ Pa
Capacidad de Sobrecalentamiento	544,31 kg/h (vapor a 100°C)
Grado de Sobrecalentamiento	38 K

Tabla 23: Características Nominales del Quemador Diésel

Marca	CIB UNIGAS S.P.A.
Tipo	LO35
Modelo	G-.TN.S.CL.A
Año	2016
Potencia Eléctrica	0,375 kW
Potencia Motor	0,075 kW
Protección	IP40
Combustible	Diésel

Tabla 24: Características Nominales de la Turbina [9]

Marca	GREENWOOD & BATLEY Ltd.
Tipo	Laval (Impulso de 1 etapa)
Presión Entrada	6,89 a 10,34 x 10 ⁵ Pa
Presión Salida	1 x 10 ⁵ Pa (vacío)
Velocidad Turbina	24000 RPM
Velocidad Salida Reductor	3000 RPM
Presión lubricación	0,34 a 1,03 x 10 ⁵ Pa
Diámetro Medio Álabes	0,1496 m
Altura Álabes	0,0127 m
Número de Toberas	3 (lado condensing) y 2 (lado no-condensing)
Ángulo de Toberas	20°
Ángulo Álabes	32° simétricos
Potencia Generada	6,6 kW – 10 HP

Tabla 25: Características Nominales Generador [9]

Marca	GREENWOOD & BATLEY Ltd. LEEDS
Embobinado	Compound
Potencia	6,6 kW
Voltaje Nominal	220 V
Corriente Nominal	30 A
Velocidad Nominal	3000 RPM

Tabla 26: Características Nominales del Condensador [9]

Marca	W. SISSON & CO. LTD.
Modelo	CI 94
Largo Condensador	0,914 m
Diámetro Condensador	0,380 m
Capacidad Condensado	680,39 kg/h a 26 pulg-Hg (en vacío)
Número de Pasos	4
Número de Tubos	126 (2 cámaras con 32 c/u y 2 cámaras con 31 c/u)
Diámetro Exterior de Tubos	0,019 m
Largo de Tubos	1,450 m
Espesor Tubos	0,003 m

Tabla 27: Características Nominales de la Bomba del líquido condensado

Marca	SIEMEN & HINSCH mbH
Modelo	LOHE 25007

Tabla 28: Características Nominales de la Torre de Enfriamiento [9]

Marca	ACME
Modelo	AIA – 85
Flujo Máximo	0,374 l/h
Tamaño del Recipiente	0,6 x 1,2 m
Carga Máxima	0,378 kg/h
Capacidad de Enfriamiento	321,89 K a 299,67 K
Capacidad de Ventiladores	11300 kg/h

Tabla 29: Características Nominales Bomba de Enfriamiento

Marca	SIGMUND PULSOMETE PUMPS LIMITED
Modelo	N 15165
Diferencia de Altura	20 m
Velocidad de Giro	2900 RPM
Capacidad	12,5 m ³ /h
Potencia	1,86 hp

Tabla 30: Características Nominales del Ablandador [9]

Marca	AGUASIN
Modelo	HS-12
Caudal Continuo de Servicio	0,34 m ³ /h
Caudal Peak	0,50 m ³ /h
Rango de Presión del Agua de Alimentación	1,03 x 10 ⁵ Pa a 4,14 x 10 ⁵ Pa
Cantidad de Sal Necesaria para cada Regeneración	3 kg
Caída de Presión en Servicio Continuo	7 m.c.a.
Caída de Presión en Peak	8 m.c.a.
Diámetro Conexiones y Válvulas	½ pulgada
Cantidad de Resina	0,012 m ³

Anexo C: Programa EES – Balances de masa y energía

A continuación se muestra el programa EES utilizado para resolver los balances de masa y energía de la Plata. Además, se presentan las incertidumbres de las variables de mediciones que se utilizaron para el cálculo de error.

"!Balances de masa y energía"

"Caldera"

```

Q_dot_util = m_dot_1 * (h_2 - h_1)
m_dot_2 = m_dot_1
m_dot_2 = m_dot_3 + m_dot_10          {-----Pto de sepación-----}
m_dot_1 = rho_1 * (d_V1 / d_t1)
eta_cald = ( Q_dot_util ) / ( m_dot_Dcal * PCI_D )

P_10=Pressure(Water;T=T_2;h=h_2)
h_2=Enthalpy(Water;T=T_2;P=P_2)
h_1=Enthalpy(Water;T=T_1;P=P_1)

rho_1=Density(Water;T=T_1;P=P_1)
m_dot_Dcal=0,0024                    {-----DATO en memoria-----}
d_V1=0,000044                       {-----DATO en memoria-----}
d_t1=1

T_1=94,2                             {-----MEDICIÓN, error = 1°C -----}
P_1=637                              {-----MEDICIÓN, error = 2,5 psi = 17,2 kPa -----}
T_2=171                              {-----MEDICIÓN, error = 1°C -----}
P_2=658,6                            {-----MEDICIÓN, error = 1 psi = 6,9 kPa -----}

```

"Desaireador"

```

m_dot_8 + m_dot_10 = m_dot_9
m_dot_8 * h_8 + m_dot_10 * h_10 = m_dot_9 * h_9
m_dot_9 = m_dot_1

h_10 = h_2
h_8=Enthalpy(Water;T=T_8;P=P_8)
T_8=16
h_9=Enthalpy(Water;T=T_9;x=0)
T_9=85,6

P_8=130                              {-----MEDICIÓN, error = 0,5 psi = 3,4 kPa -----}

```

"Balance sobrecalentador"

```

Q_dot_sob = m_dot_3 * ( h_4_sc - h_3 )
eta_sob = Q_dot_sob / ( m_dot_D * PCI_D )

h_3=Enthalpy(Water;T=T_3;P=P_3)
h_4_sc=Enthalpy(Water;T=T_4_sc;P=P_4_sc)
T_3 = T_2
P_atm = 102,62
m_dot_D=0,00032

```

PCI_D=10680*convert(kcal/kg;kJ/kg) {-----DATO en memoria-----}
rho_D=840

P_3 =658,6 {-----MEDICIÓN, error = 1 psi = 6,9 kPa -----}

T_4_sc=261,8 {-----MEDICIÓN, error = 1°C -----}
P_4_sc=665,5 {-----MEDICIÓN, error = 1 psi = 6,9 kPa-----}

"Balance Turbina"

$W_{dot_turb} = m_{dot_3} * (h_{4t} - h_{5})$
 $\eta_{turb} = (h_{4t} - h_{5}) / (h_{4t} - h_{5s})$

$h_{5s} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_{5}; P=P_{5})$
 $h_{5s} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; P=P_{5}; s=s_{4})$
 $s_{4} = \text{Entropy}(\text{Water}; T=T_{4_t}; P=P_{4_t})$
 $h_{4t} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_{4_t}; P=P_{4_t})$

T_5=68,6 {-----MEDICIÓN, error = 1°C -----}
P_5=5,9 {-----MEDICIÓN, 1 psi = 6,9 kPa -----}
T_4_t=204,8 {-----MEDICIÓN, error = 1°C -----}
P_4_t=798,3 {-----MEDICIÓN, error = 2,5 psi = 17,2 kPa -----}

"Generador"

$N_e = (V * I) / 1000$
 $N_{eje} = (F_{freno} * R * \omega) / 1000$
 $\eta_g = N_e / N_{eje}$

V=150 {-----MEDICIÓN, error = 5 V -----}
I=12,1 {-----MEDICIÓN, error = 1 A -----}
R=0,31 "Brazo reductor"
 $\omega = 319,9$ {-----MEDICIÓN, error= 50 rpm = 5,2 rad/s -----}
F_freno=28,5 {-----MEDICIÓN, error = 0,1 lb = 0,4 N-----}

"Condensador"

$Q_{dot_cond} = m_{dot_3} * (h_{5} - h_{6})$
 $Q_{dot_cond} = m_{dot_11} * c_{p_w} * (3,6)$

$h_{6} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_{6}; P=P_{6})$
cp_w=4,18

T_6 =32 {-----MEDICIÓN, error = 1°C -----}
P_6=5,4 {-----MEDICIÓN, error = 0,25 inHg = 0,8 kPa -----}

"Balance torre de enfriamiento"

$m_{dot_11} * h_{11} + m_{dot_13} * h_{13} = m_{dot_12} * h_{12} + m_{dot_14} * h_{14}$
 $m_{dot_13} = m_{dot_12}$
 $m_{dot_13} * w_{13} + m_{dot_11} = m_{dot_12} * w_{12} + m_{dot_14}$
 $m_{dot_rep} = m_{dot_11} - m_{dot_14}$

$h_{11} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_{11}; P=P_{11})$
 $h_{13} = 37,55$
 $w_{13} = 0,008492$ {extraído de ensayo}
 $h_{14} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_{14}; P=P_{14})$
 $w_{12} = \text{HumRat}(\text{AirH2O}; T=17,7; r=1; P=P_{\text{atm}})$
 $h_{12} = \text{Enthalpy}(\text{AirH2O}; T=17,7; r=1; P=P_{\text{atm}})$

$T_{11} = 28,1$ {-----MEDICIÓN, error = 1°C -----}
 $P_{11} = 160 + P_{\text{atm}}$
 $T_{14} = 18,7$ {-----MEDICIÓN, error = 1°C -----}
 $P_{14} = -17 + P_{\text{atm}}$

"-----"

"Rendimiento del Ciclo"

$$\eta_{\text{ciclo}} = ((N_e - (N_{\text{dot_bbaA}} * 2) + N_{\text{dot_bbaC}} + N_{\text{dot_bbaD}}) / (Q_{\text{dot_comb}})) * 100$$

$$Q_{\text{dot_comb}} = (PCI_D * m_{\text{dot_D}} + m_{\text{dot_Dcal}} * PCI_D)$$

"-----"

"Bomba A, Condensador - Pozo"

$h_{6_sal} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; P=P_{6_sal}; T=T_{6_sal})$
 $T_{6_sal} = T_6 + 1$
 $P_{6_sal} = P_{\text{atm}}$ "asumida"
 $h_{s_6_sal} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; P=P_{6_sal}; s=s_6)$
 $s_6 = \text{Entropy}(\text{Water}; h=h_6; T=T_6)$
 $\epsilon_{s_bba} = 0,7$ "Fabricante"

$$N_{\text{dot_bbaA}} = m_{\text{dot_6}} * (h_{6_sal} - h_6)$$

$$m_{\text{dot_6}} = 0,95 * m_{\text{dot_3}}$$

$$N_{\text{dot_s_bbaA}} = m_{\text{dot_6}} * (h_{s_6_sal} - h_6)$$

$$N_{\text{dot_bbaA}} = N_{\text{dot_s_bbaA}} / \epsilon_{s_bbaA}$$

"Bomba B, Estanque - Desaireador apagada"

"Bomba C, Desaireador - Caldera "

$$N_{\text{dot_s_bbaC}} = m_{\text{dot_1}} * v_{\text{esp_9}} * (P_{9_sal} - P_9)$$

$$N_{\text{dot_bbaC}} = N_{\text{dot_s_bbaC}} / \epsilon_{s_bba}$$

$$v_{\text{esp_9}} = \text{Volume}(\text{Water}; h=h_9; P=P_9)$$

$$P_9 = P_{\text{atm}}$$

$$P_{9_sal} = 699,5$$

"Bomba D, Torre de Enfriamiento"

$$N_{\text{dot_s_bbaD}} = m_{\text{dot_11}} * v_{\text{esp_14}} * (P_{14_sal} - P_{14})$$

$$N_{\text{dot_bbaD}} = N_{\text{dot_s_bbaD}} / \epsilon_{s_bba}$$

$$v_{\text{esp_14}} = \text{Volume}(\text{Water}; h=h_{14}; P=P_{14})$$

$$P_{14_sal} = 160 + P_{\text{atm}}$$

F_freno	28,5		0,4
l	12,1		1
omega	319,9		5,2
P_1	637		17,2
P_2	658,6		6,9
P_3	658,6		6,9
P_4_sc	665,5		6,9
P_4_t	798,3		17,2
P_5	5		6,9
P_6	4,6		0,8
P_8	130		3,4
T_1	94,2		1
T_11	28,1		1
T_14	18,7		1
T_2	171		1
T_4_sc	261,8		1
T_4_t	204,8		1
T_5	68,6		1
T_6	32		1
V	150		5

Figura 6.2: Incertidumbres de Variables Medidas

Anexo D: Presupuestos de las Empresas

A continuación se muestra el presupuesto por parte de la Empresa A (INGERO).





Item	Descripción	Imagen	Unid.	Cant.	P.U. Neto [CLP]	P. Total [CLP]
Sistema de monitoreo en local	<p>i. Habilitación de sistema de monitoreo PEM, incluye:</p> <ul style="list-style-type: none"> Fabricación y montaje en terreno de 1 tablero general de monitoreo con microcomputador Confección de Dashboard de monitoreo a la medida (TIPO SCADA) con acceso local para visualización y descarga de datos históricos desde el tablero. Pantalla Táctil de 15" para visualización y descarga de datos. UPS de respaldo en caso de corte de energía. <p>Los Parámetros a Monitorear son:</p> <ul style="list-style-type: none"> Caldera: Presión y temperatura descarga vapor. Flujo y temperatura ingreso de alimentación agua desde precalentador. Chimenea Caldera: Presión y temperatura gases de combustión. Quemador Caldera: Presión diferencial succión-descarga aire. Temperatura de aire. Flujo (existente), presión (existente) y temperatura (existente) de gas natural. Sobrecalentador: Flujo, temperatura y presión de vapor. Chimenea Sobrecalentador: Presión y temperatura gases de combustión. Quemador sobrecalentador: Presión diferencial succión-descarga aire. Estado (On – Off). Flujo gas natural. Desaireador: Presión de vapor en acometida. Turbina de vapor: presión y temperatura en acometida de vapor. Condensador: Temperatura y presión (vacío). Agua Condensador: Flujo, temperatura de entrada y salida. Bombas agua refrigeración en condensador: Presión succión y descarga Generador eléctrico: Energía generada, Potencias, Voltajes, Corriente por fase, etc. 	 Tablero Monitoreo				
	<p>ii. Suministro e instalación de 2 Flujómetro de turbina para agua caliente con las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> Principio de medición: Turbina Efecto Hall. Medio: Agua Caliente Diámetro: Máximo DN50. Precisión +/- 1,5% del valor medido 	 Flujometro turbina				
	<p>iii. Suministro e instalación de 1 flujómetros Vortex para vapor sobrecalentado, con las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> Principio de medición: Frecuencia de vórtice. Medio: Vapor Sobrecalentado. Diámetro: Máximo DN100. Precisión +/- 1,5% del valor medido (DN100) Con compensación por temperatura y presión. 	 Flujometro Vortex				
	<p>iv. Suministro e instalación de 1 flujómetros masico térmico para gas natural, con las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> Principio de medición: Masico Térmico. Medio: Gas Natural Diámetro: Variable. Precisión +/- 2,5% del valor medido 	 Flujometro Gas Natural	Global	1	\$29.676.439	\$29.676.439

Figura 6.3: Presupuesto Empresa A - Parte 1






v.	Suministro e instalación de 11 sensores de temperatura, rango acorde al proceso.	 Transmisor de temperatura				
vi.	Suministro e instalación de 9 transmisores de presión, rango acorde al proceso.	 Transmisor de Presion y presion Diferencial				
vii.	Suministro e instalación de 2 transmisores de presión diferencial, rango acorde al proceso.	 Analizador de Energia Corriente continua				
viii.	<p>Suministro e instalación de 1 medidor de energía corriente continua, con las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> Medición de parámetros eléctricos corriente continua: Voltaje, Corriente y Potencia. incluye transductor de corriente continua 0-50A (Efecto Hall), para medición de corriente de forma no invasiva. 	 Flujometro mecanico con salida de pulsos				
ix.	<p>Suministro e instalación de PLC modelo Schneider Modicon Easy M200 con 4 entradas rápidas, 4 entradas de alta velocidad, 6 entradas regulares y 10 salidas de relé.</p> <ul style="list-style-type: none"> Para control de flujo quemador sobrecalentador mediante válvula modulante. 	 Valvula modulante				
x.	<p>Suministro e instalación de 1 Flujómetro mecánico con salida de pulsos para agua circuito refrigeración condensador con las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> Medio: Agua. Diámetro: Máximo DN80. Salida: Pulsos. 					
xi.	<p>Montaje quemador sobrecalentador, incluye:</p> <ul style="list-style-type: none"> Materiales montaje mecánico. Conexión red de gas. Conexión eléctrica quemador. 					
xii.	<p>Suministro e instalación de válvula de bola modulante para línea de gas quemador de sobrecalentador, con las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> Diámetro: 1". Medio: Gas Natural. Posiciones: Cualquiera. Tipo: Válvula de bola. ATEX. 					

Figura 6.4: Presupuesto Empresa A - Parte 2

Ahora se muestran los presupuestos por parte de la Empresa B (YOKOGAWA y KIESO).

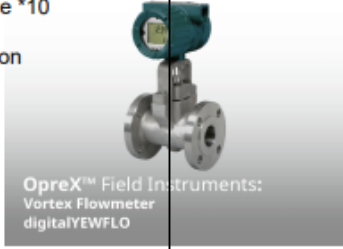

ITEM	CANT.	DESCRIPCION	PRECIO UNIT. US\$	TOTAL ITEM US\$																																							
1	01	<p>digitalYEWFLO Vortex Flowmeter</p> <p>Model DY040-JBLBA1-2D/L2/SCT/MV/X2/R1</p> <p>DY040 Size 40 mm (1-1/2 inch) [-J] Converter Output Signal and Communication 4 to 20 mA DC, Pulse, HART 5/HART 7 Communication [B] Body Material ASTM CF8M [L] Shedder bar Material Duplex Stainless Steel [BA1] Process Connection ANSI Class 150 Flange(Raised Face) [-2] Electrical Connection ANSI 1/2 NPT Female *10 [D] IndicatorWith Indicator [/L2] Calibration Certificate: Declaration and Calibration Equipment List [/SCT] Stainless Steel Tag Plate [/MV] Multi-Variable Type [/X2] Piling up coating of epoxy and polyurethane [/R1] Reduced bore type</p> <p>Plazo de entrega 9 a 11 semanas</p>  <p>OpreX™ Field Instruments: Vortex Flowmeter digitalYEFLO</p>	\$ 4.618,00	\$ 4.618,00																																							
2	01	<p>DX2000 Data Acquisition unit:</p> <p>DX2010-3-4-2/A2/C3/D5/H2/H5H/N2/N3/USB1/PM1</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>DX2010</th> <th>MODEL</th> <th>DX2000 (10ch, 1s (Fast sampling mode: 125ms)) Data Acquisition unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-3</td> <td>01_Internal memory size</td> <td>400 MB</td> </tr> <tr> <td>-4</td> <td>02_Ext. memory medium</td> <td>CF card (with medium)</td> </tr> <tr> <td>-2</td> <td>03_Display language</td> <td>English display & degF/DST</td> </tr> <tr> <td>/A2</td> <td>001_Optional features</td> <td>Alarm output relay 4 points</td> </tr> <tr> <td>/C3</td> <td>002_Optional features</td> <td>RS-422/485 interface</td> </tr> <tr> <td>/D5</td> <td>003_Optional features</td> <td>VGA output</td> </tr> <tr> <td>/H2</td> <td>005_Optional features</td> <td>Clamped input terminal (detachable)</td> </tr> <tr> <td>/H5H</td> <td>006_Optional features</td> <td>Desktop type (GB power cable)</td> </tr> <tr> <td>/N2</td> <td>008_Optional features</td> <td>3 legs isolated RTD</td> </tr> <tr> <td>/N3</td> <td>009_Optional features</td> <td>Extra input types</td> </tr> <tr> <td>/USB1</td> <td>014_Optional features</td> <td>USB interface</td> </tr> <tr> <td>/PM1</td> <td>015_Optional features</td> <td>Pulse input (3 points)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Plazo de entrega 4 a 6 semanas</p> 	DX2010	MODEL	DX2000 (10ch, 1s (Fast sampling mode: 125ms)) Data Acquisition unit	-3	01_Internal memory size	400 MB	-4	02_Ext. memory medium	CF card (with medium)	-2	03_Display language	English display & degF/DST	/A2	001_Optional features	Alarm output relay 4 points	/C3	002_Optional features	RS-422/485 interface	/D5	003_Optional features	VGA output	/H2	005_Optional features	Clamped input terminal (detachable)	/H5H	006_Optional features	Desktop type (GB power cable)	/N2	008_Optional features	3 legs isolated RTD	/N3	009_Optional features	Extra input types	/USB1	014_Optional features	USB interface	/PM1	015_Optional features	Pulse input (3 points)	\$5.950	\$5.950
DX2010	MODEL	DX2000 (10ch, 1s (Fast sampling mode: 125ms)) Data Acquisition unit																																									
-3	01_Internal memory size	400 MB																																									
-4	02_Ext. memory medium	CF card (with medium)																																									
-2	03_Display language	English display & degF/DST																																									
/A2	001_Optional features	Alarm output relay 4 points																																									
/C3	002_Optional features	RS-422/485 interface																																									
/D5	003_Optional features	VGA output																																									
/H2	005_Optional features	Clamped input terminal (detachable)																																									
/H5H	006_Optional features	Desktop type (GB power cable)																																									
/N2	008_Optional features	3 legs isolated RTD																																									
/N3	009_Optional features	Extra input types																																									
/USB1	014_Optional features	USB interface																																									
/PM1	015_Optional features	Pulse input (3 points)																																									

Figura 6.5: Presupuesto de Empresa B



KEISO SPA
AV. LOS CARRERA 1138
CONCEPCION 08
Chile

udec

Presupuesto # S00261

Fecha de presupuesto:
22/08/2023

Vencimiento:
31/08/2023

Vendedor:
Alvaro Padilla

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UN.	IMPUESTOS	IMPORTE
Instalacion de maquetas en UDEC, laboratorio	1,00 Unidades	4.158.900,00	IVA 19% Vta	\$ 4.158.900

Subtotal	\$ 4.158.900
IVA 19%	\$ 790.191
Total	\$ 4.949.091

Contempla:

Instalacion y configuracion de equipos registradores en tablero existentes.
Instalacion de pantalla para visualizacion de datos.
Control de gas para Regulacion de energia.
Capacitacion a personal para operacion de equipos.

Figura 6.6: Presupuesto de implementación de Empresa B

Para la propuesta propia se cuenta con los 2 equipos que vende la Empresa B, además, se encontraron los siguientes equipos en distintas páginas de internet, las cuales son mencionadas a continuación.

El flujómetro másico para gas natural fue encontrado AliExpress.



CLP498.962 ~~CLP530.814~~ -6%

Medidor de flujo de Gas térmico, dispositivo de compresión de aire de Gas Natural, tipo de inserción de DN50-DN500, O2, H2, CH4, 4-20mA, RS485, biogás, GLP

1 Vendidos

Descuento cupón

CLP14.562 off
en pedidos +CLP291.246

1 off
Buy 2 pieces

Color: 500mm Insertion type

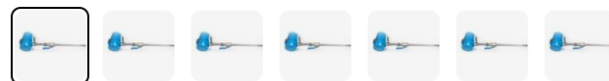


Figura 6.7: Flujómetro másico para gas natural

La termocupla para los gases de combustión fue cotizada en HANNA instruments.



Sonda Termopar Tipo K Flexible para Altas Temperaturas - HI766F

SKU: HI766F

[Sé el primero en revisar este producto](#)

\$59.800

Precio sin IVA incluido

Unidades

[Añadir al Carro](#)

El HI766F es una sonda termopar tipo K con recubrimiento flexible diseñada para usarse con un termómetro termopar. El cable se extiende 1m (3.3') desde el final del sensor hasta el conector del termopar con el equipo; el HI766F no tiene mango incorporado. La sonda flexible de acero inoxidable permite a los usuarios obtener lecturas altamente precisas de una variedad de superficies de alta temperatura.

Lecturas de hasta 1100°C (2000°F)

Tiempo de respuesta de 4 segundos

Acero inoxidable AISI 316

Figura 6.8: Termocupla para altas temperaturas

El analizador de gases de combustión fue cotizado en AliExpress.



CLP 1.014.308

Testo 340-Analizador de gases de combustión para uso industrial, Original

Figura 6.9: Analizador de gases de combustión

Los transmisores de presión y psicómetro fueron cotizados en Veto.



TRANSMISOR DE PRESIÓN

CÓDIGO: C9020211

Rango 0 + 10 bar, salida 4-20 mA, acero inox., 1/2 NPT

Normal:
\$ 146.692

Precio Internet:
\$ 124.688

Precio incluye IVA

- 1 +

COMPRAR

COTIZAR

Descripción

Especificaciones

Manuales y Descarga

Transmisor de presión con salida 4-20 mA con dos cables. Cuerpo a prueba de polvo y agua (IP65), soporta fluidos con una temperatura de entre -30 y 100 °C, cuenta con protección contra inversión de polaridad y función de ajuste de zero/span.

Este transmisor de presión se utiliza prácticamente en cualquier sistema de control de presión, ya sea se trabaje con flujos de líquidos, agua, aceites, gases o vapores.

Figura 6.10: Transmisor de presión



TERMÓMETRO-HIGRÓMETRO DIGITAL DE BOLSILLO

CÓDIGO: A6030330

Rango temp -10,0 + 60,0 °C, Rango humedad 0 + 100 % RH. Función máxima y mínima, Hold. Punto de rocío.

Normal:
\$ 153.659

Precio Internet:
\$ 130.610

Precio incluye IVA

- 1 +

COMPRAR

COTIZAR

Descripción

Especificaciones

Manuales y Descarga

Termómetro higrómetro . Función máxima - mínima, retención de lectura (hold), Punto de rocío.

Figura 6.11: Psicómetro

El sistema de trampas de vapor para vapor saturado y sobrecalentado fue cotizado en Spirax Sarco.





TAG / HOJA DE DATOS	IMAGEN REFERENCIA	CANT	CODIGO	DESCRIPCION COMPLETA	DESCRIPCION CORTA	PRECIO UNITARIO SIN IVA
		4	30729009	Trampa de vapor, tipo balde invertido, con elemento filtrante incorporado, de alta eficiencia, DN 1/2", conexión conforme ASME B1.20.1 NPT, cuerpo en ASTM A 126 Cl B, internos en acero inoxidable serie AISI 400 endurecidos, clase de presión 250 psig/ 232°C, presión máxima diferencial 9 barg, modelo B1HS-125 1/2" NPT, Fabricación Spirax-Sarco. Origen USA	B1HS-125 1/2" NPT TRAMPA BALDE INVERTIDO	CLP 337,348
Para sistema vapor saturado		6	31330190	Válvula de bola tipo HIGH PERFORMANCE, construcción FORJADA para servicio pesado, tres cuerpos, paso reducido, cuerpo y tapa en forjado ASTM A 105 con revestimiento externo niquelado (ENP) - más resistente a la corrosión, clase de presión PN100, conforme European Pressure Equipment Directive (PED), especial para aplicaciones críticas en vapor y otros fluidos, esfera en AISI 316, asiento de alta eficiencia en PDR 0,8, diseñada para operar con vapor saturado hasta 17,5 barg, temperatura máxima 260°C @ 0 barg, presión máxima 100 barg @ 60°C, conexión roscada acuerdo al ASME B1.20.1 NPT, modelo M10S2 1/2" NPT ASTM A105 PN100 RB, Fabricación Spirax-Sarco	M10S2 1/2" NPT RB A105 PN100 HIGH PERFORMANCE	CLP 101,308
Para sistema vapor saturado		2	31630090	Filtro Y de partículas, modelo FIG12, para líneas de vapor, agua, aceites, aire y gases, conforme EU Pressure Equipment Directive/UK Pressure Equipment (Safety) Regulations, cuerpo en hierro modular, elemento filtrante 0,8mm en acero inoxidable AISI 316L, clase de presión PN25, presión máxima de vapor saturado 21 barg, presión máxima 25 bar g @ 120°C, temperatura máxima 260°C @ 19,5 bar g, 1/2", conexión NPT, modelo FIG.12 1/2" NPT SG IRON 0,8mm, Fabricación Spirax-Sarco. Origen: Francia	FIG.12 1/2" NPT 0,8mm FILTRO Y	CLP 67,890
Para sistema vapor sobrecalentado		6	31326090	Válvula globo con sello por fuelle en acero inoxidable con titanio para trabajar sin fugas, modelo A3S, en acuerdo con European Pressure Equipment Directive (PED), cuerpo en acero carbono forjado ASTM A 105, internos especiales en acero inoxidable con asiento integral en Stellite Nr.6 y disco en ASTM A 276 410 endurecido y fuelle en ASTM A479 Gr 321, especial para vapor, aceite térmico, líquidos y gases, clase de presión ASME 800#, conexión roscada ASME B1.20.1 NPT, presión máxima 99 bar g @ 360°C, temperatura máxima 400°C @ 40 bar g, para máxima vida útil no utilizar arriba de 40 bar g @ 400°C, DN15. Ficha Técnica: TI-P132-09 CMGT Issue 7Modelo A3S 1/2" NPT 800# A105 GLOBO SELLADA POR FUELLEFabricación Spirax-Sarco. Origen Italia	A3S 1/2" NPT 800# VÁLVULA GLOBO CON FUELLE	CLP 320,831
Para sistema vapor sobrecalentado		2	31692691	Filtro Y de partículas, modelo FIG14HP, aplicación para altas presiones para líneas de vapor, agua, aceites, aire y gases, conforme Pressure Equipment Directive (PED), cuerpo en acero carbono forjado ASTM A 105, elemento filtrante 0,8mm en acero inoxidable AISI 316L, clase de presión ASME 800#, presión máxima 136.1 bar g @ 38°C, temperatura máxima 425°C @ 76.7 bar g, conexión NPT, DN 1/2", modelo FIG.14HP 1/2" NPT 0,8mm ASME 800# A105N, Fabricación Spirax-Sarco Origen: Francia	FIG.14HP 1/2" NPT 0,8mm 800# FILTRO Y	CLP 130,802

Figura 6.12: Presupuesto de sistema de trampas de vapor

Finalmente, el aislante térmico fue cotizado en Sodimac, y se utilizará lana de vidrio.



LUMAX Código del producto: 120597461

Rollo Lana de Vidrio Foil Aluminio 50mm Rinde 18mts2 MeTinca

★★★★☆ 3.4 (8) [Calificar](#)

Vendido por **Metinca Spa**

\$ 30.990 -28%
~~\$ 42.990~~

 **Despacho a domicilio**
[Ver disponibilidad](#)

 **Retira tu compra**
No disponible para retiro

 **Stock en tienda**
[Revisar](#)

 Acumula hasta **154 Puntos** [Ver opciones](#)

1 + Máximo 20 unidades.

Agregar al Carro

 ¿AÚN NO TIENES TU CMR BANCO FALABELLA?
Ábrela ahora y obtén \$10.000 de descuento.

Figura 6.13: Aislante térmico

Anexo E: Respuestas Encuesta de Satisfacción

En las siguientes Figuras se presentan los resultados de las preguntas de la encuesta de satisfacción.

2. ¿Considera que la experiencia actual de Laboratorio en Planta de Vapor contribuye en el aprendizaje de conceptos relacionados al área de Termofluidos?

[Más detalles](#)

Información

6.07
Clasificación promedio

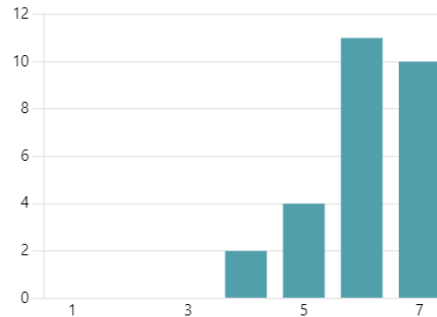


Figura 6.14: Respuesta Encuesta, Pregunta 2

4. ¿Ha tenido alguna dificultad o limitación para acceder o visualizar los instrumentos de medición?

[Más detalles](#)

Información

● Sí 13
● No 14



Figura 6.15: Respuesta Encuesta, Pregunta 4

5. ¿Considera que la resolución de los instrumentos actuales es suficiente para realizar las experiencias de Laboratorio?

[Más detalles](#)

Información

4.19
Clasificación promedio

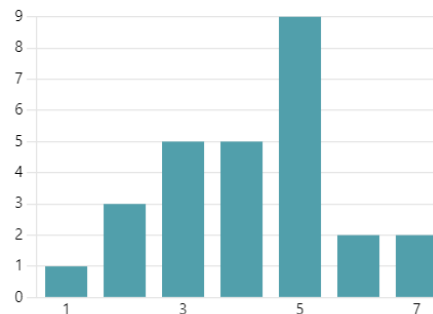


Figura 6.16: Respuesta Encuesta, Pregunta 5

6. ¿Cuál es su preferencia con relación a la adquisición de datos en el Laboratorio?

[Más detalles](#)

- Manual con instrumento análogo 10
- Manual con instrumento digital 9
- Automático con instrumento di... 8



Figura 6.17: Respuesta Encuesta, Pregunta 6

7. ¿Encuentra útil la presentación visual de las variables experimentales en el sistema local?

[Más detalles](#)

[Información](#)

6.52
Clasificación promedio

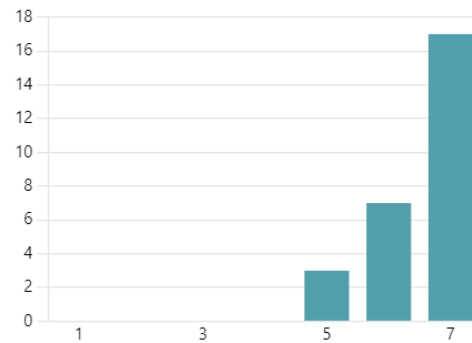


Figura 6.18: Respuesta Encuesta, Pregunta 7

8. ¿Considera que la información mostrada en el sistema local es clara y fácil de interpretar?

[Más detalles](#)

[Información](#)

6.11
Clasificación promedio

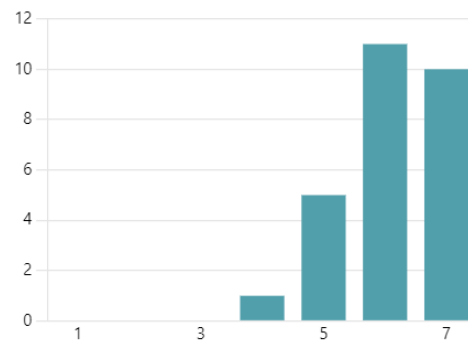


Figura 6.19: Respuesta Encuesta, Pregunta 8

9. ¿Crees que con la modernización de la Planta mejorará el proceso enseñanza-aprendizaje?

[Más detalles](#)

[Información](#)

6.44
Clasificación promedio

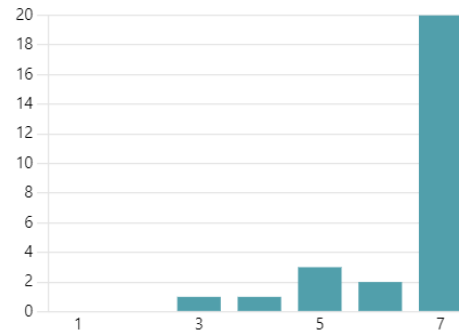


Figura 6.20: Respuesta Encuesta, Pregunta 9

10. ¿Crees que las mediciones más precisas y la visualización de datos contribuirán a una mejor comprensión de los conceptos teóricos?

[Más detalles](#)

[Información](#)

6.04
Clasificación promedio

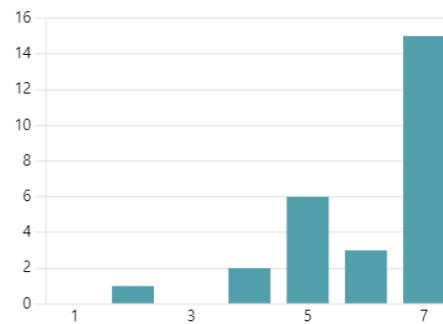


Figura 6.21: Respuesta Encuesta, Pregunta 10

11. ¿Considera que los nuevos instrumentos y visualizaciones facilitan su comprensión del ciclo de vapor?

[Más detalles](#)

[Información](#)

6.19
Clasificación promedio

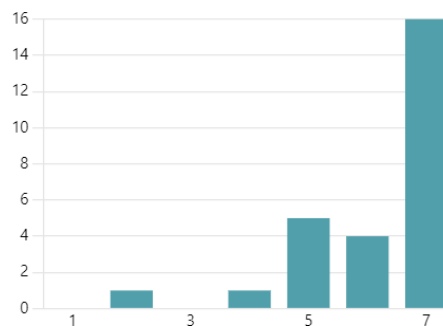


Figura 6.22: Respuesta Encuesta, Pregunta 11

12. ¿Se siente más motivado para participar activamente en las experiencias de Laboratorio de la Planta a Vapor con la nueva implementación?

[Más detalles](#)

[Información](#)

6.44
Clasificación promedio

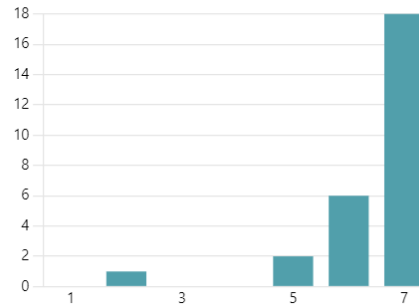


Figura 6.23: Respuesta Encuesta, Pregunta 12

Anexo F: Competencias y KPIs de la Carrera Ingeniería Civil Mecánica

En la siguiente Tabla se describen las competencias del perfil de egreso de la carrera Ingeniería Civil Mecánica.

Tabla 31: Competencias de la Carrera

N°	Nombre	Descripción
C1	Resolución de problemas	Habilidad para identificar, formular y resolver problemas complejos de ingeniería aplicando principios de ingeniería, ciencias y matemáticas.
C2	Diseño de Ingeniería	Habilidad para aplicar el diseño de ingeniería para producir soluciones que satisfagan necesidades específicas considerando la salud pública, la seguridad y el bienestar, así como factores globales, culturales, sociales, ambientales y económicos.
C3	Comunicación Efectiva	Habilidad para comunicarse de manera efectiva con una variedad de audiencias.
C4	Responsabilidad Social	Habilidad para reconocer responsabilidades éticas y profesionales en situaciones de ingeniería y hacer juicios informados, que deben considerar el impacto de las soluciones de ingeniería en contextos globales, económicos, ambientales y sociales.
C5	Trabajo en Equipo	Habilidad para funcionar eficazmente en un equipo cuyos miembros juntos brindan liderazgo, crean un entorno colaborativo e inclusivo, establecen metas, planifican tareas y cumplen objetivos.
C6	Diseño Experimental	Habilidad para desarrollar y realizar experimentación adecuada, analizar e interpretar datos y utilizar el juicio de ingeniería para generar conclusiones.
C7	Aprendizaje Continuo	Habilidad para adquirir y aplicar nuevos conocimientos, según sea requerido, mediante estrategias de aprendizaje adecuadas.

En la siguiente Tabla se describen los indicadores clave de desempeño del perfil de egreso de la carrera Ingeniería Civil Mecánica

Tabla 32: Indicadores Clave de Desempeño de la Carrera

Competencia	N° KPI	Descripción
C1 (Resolución de problemas)	1.1	Identificar los componentes de un problema complejo y los mecanismos relevantes.
	1.2	Formular y expresar problemas complejos dentro del campo de la ingeniería mecánica utilizando herramientas matemáticas o computacionales.
	1.3	Resolver o identificar soluciones para problemas complejos aplicando herramientas de ingeniería.
C2 (Diseño de Ingeniería)	2.1	Concebir, diseñar, implementar y/u operar sistemas, productos y procesos relevantes para la ingeniería mecánica y disciplinas similares, para crear soluciones combinando las herramientas de la ciencia y la tecnología.
	2.2	Evaluar los costos de inversión y operación en proyectos asociados con la industria.
	2.3	Evaluar los riesgos operativos asociados con la industria.
	2.4	Aplicar criterios para un diseño y operación seguros, considerando aspectos de seguridad, salud y medio ambiente.
C3 (Comunicación Efectiva)	3.1	Comunicar efectivamente a través de habilidades de escritura.
	3.2	Comunicar efectivamente a través de las habilidades orales.
	3.3	Comunicar efectivamente a través de habilidades gráficas o de dibujo.
	3.4	Comunicar efectivamente a una amplia gama de audiencias.
C4 (Responsabilidad Social)	4.1	Comprender los impactos económicos de las decisiones asociadas con la práctica de la ingeniería mecánica.
	4.2	Comprender los impactos ambientales de la práctica de ingeniería mecánica.
	4.3	Comprender las implicaciones éticas y la responsabilidad social de la práctica de la ingeniería mecánica.
C5 (Trabajo en Equipo)	5.1	Demostrar capacidad de trabajo en equipo y liderazgo.
	5.2	Funcionar en un equipo caracterizado por un entorno colaborativo e inclusivo.
	5.3	Formular y ejecutar un plan de trabajo con objetivos y metas.
C6 (Diseño Experimental)	6.1	Realizar investigaciones sobre el estado del arte de las disciplinas asociadas con la ingeniería mecánica.
	6.2	Formular objetivos de trabajo.

	6.3	Diseñar y realizar experimentos.
	6.4	Analizar e interpretar resultados.
C7 (Aprendizaje Continuo)	7.1	Seleccionar información científica y tecnológica.
	7.2	Identificar tópicos emergentes relevantes para la ingeniería mecánica.
	7.3	Aplicar el pensamiento crítico, la capacidad creativa y la curiosidad tecnológica científica.
	7.4	Actualizar y mejorar las habilidades de ingeniería.
C8 (Gestión de Recursos)	8.1	Gestionar recursos financieros.
	8.2	Gestionar recursos humanos.
	8.3	Gestionar recursos materiales.