



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES
DE ENTRADA EN EL RENDIMIENTO DE UN CICLO
COMBINADO DE POTENCIA MEDIANTE SIMULACIÓN”**

Trabajo de Titulación

Tipo: PROYECTO TÉCNICO

Presentado para el grado académico de:

INGENIERA QUÍMICA

AUTORA: JENNYFER PATRICIA TIBÁN BASANTES

TUTOR: ING. PAÚL PALMAY PAREDES

Riobamba – Ecuador

2018

©2018, Jennyfer Patricia Tibán Basantes

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

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal de Trabajo de titulación certifica que: el presente trabajo técnico de **DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE ENTRADA EN EL RENDIMIENTO DE UN CICLO COMBINADO DE POTENCIA MEDIANTE SIMULACIÓN**” de responsabilidad de la señorita Jennyfer Patricia Tibán Basantes ha sido revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de titulación, quedando autorizada así su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Paúl Palmay Paredes DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	2018-11-08
Ing. Mayra Zambrano Vinueza MIEMBRO DEL TRIBUNAL	2018-11-08

“Yo, Jennyfer Patricia Tibán Basantes, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de titulación, y el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo”

JENNYFER PATRICIA TIBÁN BASANTES

DEDICATORIA

A mis mamás Jenny Basantes e Hilda Tibán por su cariño y apoyo incondicional, sus esfuerzos se ven reflejados en este logro que no es solo mío, sino también de ustedes.

A mi hermana Fernanda Villa por creer en mí siempre y por su cariño, ocupas un lugar importante en mi vida y este pequeño logro en mi vida es para ti.

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme salud, vida, inteligencia, fuerza, fortaleza, y sobre todo a mi familia.

A la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO por haberme formado como profesional.

A mis profesores de la carrera de Ingeniería Química por haberme dado las herramientas necesarias en el proceso de aprendizaje y ser así una buena profesional.

A mi tutor Ing. Paúl Palmay, a la Ing. Mayra Zambrano docente colaboradora, y al Ing. Hugo Calderón miembro del tribunal.

A mi familia por ser un pilar fundamental en mi camino hacia mis metas, en especial a mi tío Guber Basantes, mi tía Elizabeth Vega, mis primas Vanesa, Domenica, y Paola Basantes Vega por su cariño y apoyo incondicional, a mi prima Consuelo Basantes por estar a mi lado toda mi vida.

A mis amigos por su apoyo incondicional.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
CAPITULO 1	
1. DIAGNOSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Identificación del Problema.....	1
1.2. Justificación del Proyecto.....	1
1.3. Línea Base del Proyecto.....	2
1.3.1. <i>Antecedentes de la Investigación</i>	2
1.3.2. <i>Marco Conceptual</i>	3
1.3.2.1. <i>Programa Simulador Aspen Hysys.....</i>	3
1.3.2.2. <i>Tipos de operaciones unitarias que contiene HYSYS.....</i>	4
1.3.2.3. <i>Ventajas del Hysys.....</i>	4
1.3.2.4. <i>Conceptos básicos de Termodinámica.....</i>	5
1.3.2.5. <i>Diagrama termodinámicas.....</i>	7
1.3.2.6. <i>Paquetes termodinámicos.....</i>	9
1.3.3. <i>Centrales generadoras de energía</i>	11
1.3.3.1. <i>Central hidroeléctrica.....</i>	11
1.3.3.2. <i>Central termoeléctrica.....</i>	12
1.3.3.3. <i>Ciclos de potencia.....</i>	14
1.3.3.4. <i>Antecedentes históricos del ciclo combinado de potencia.....</i>	16
1.3.3.5. <i>Componentes del ciclo combinado gas-vapor.....</i>	16
1.3.4. <i>Condiciones de operación</i>	18

1.3.4.1.	<i>Región Costa</i>	18
1.3.4.2	<i>Región Sierra</i>	19
1.3.4.3.	<i>Región Amazonía</i>	19
1.3.5	<i>Diferencia entre cálculos Manuales y Simulación</i>	20
1.4.	Beneficiario directos e indirectos	21
1.4.1.	<i>Directos</i>	21
1.4.2.	<i>Indirectos</i>	21
CAPITULO II.		
2.	OBJETIVOS DEL PROYECTO	22
2.1.	Objetivo General	22
2.2.	Objetivos Específicos	22
CAPITULO III		
3.	ESTUDIO TÉCNICO PRELIMINAR	23
3.1.1	<i>Localización del proyecto</i>	23
3.2.	Ingeniería del proyecto	24
3.2.1.	<i>Tipo de Estudio</i>	24
3.3	Metodología	24
3.3.1.	<i>Métodos y Técnicas</i>	24
3.3.1.1.	<i>Métodos</i>	24
3.3.1.2.	<i>Técnicas</i>	26
3.4.	Diseño Conceptual	41
3.5	Cálculos de Ingeniería	43
3.5.1.	<i>Ciclo de potencia de gas</i>	43
3.5.1.1.	<i>Trabajo consumido por el compresor</i>	46
3.5.1.2.	<i>Temperatura del aire a la salida del compresor</i>	46

3.5.1.3.	<i>Potencia consumida por el compresor.....</i>	47
3.5.1.4.	<i>Trabajo generado por la turbina de gas.....</i>	47
3.5.1.5.	<i>Potencia generada por la turbina de gas.....</i>	48
3.5.1.6.	<i>Rendimiento del trabajo en relación al compresor.....</i>	49
3.5.1.7.	<i>Calor absorbido por la cámara de combustión.....</i>	49
3.5.1.8.	<i>Requerimiento de combustible.....</i>	49
3.5.1.9.	<i>Trabajo neto del ciclo de gas.....</i>	52
3.5.1.10.	<i>Eficiencia del ciclo de gas.....</i>	52
3.5.1.11.	<i>Potencia producida por el ciclo de gas.....</i>	52
3.5.2.	<i>Ciclo de potencia de vapor</i>	53
3.5.2.1.	<i>Calidad de vapor.....</i>	55
3.5.2.2.	<i>Trabajo generado por la turbina de vapor.....</i>	56
3.5.2.3.	<i>Flujo másico a través de la turbina de vapor.....</i>	56
3.5.2.4.	<i>Trabajo generado por la bomba.....</i>	56
3.5.2.5.	<i>Potencia generada por la bomba.....</i>	57
3.5.2.6.	<i>Calor que ingresa al ciclo de vapor.....</i>	57
3.5.2.7.	<i>Calor que sale del ciclo de vapor.....</i>	58
3.5.2.8.	<i>Trabajo neto del ciclo de vapor.....</i>	58
3.5.2.9.	<i>Eficiencia neta del ciclo de vapor.....</i>	58
3.5.2.10.	<i>Potencia generada por el ciclo de vapor.....</i>	59
3.5.3.	<i>Ciclo combinado de potencia</i>	59
3.5.3.1.	<i>Relacion de flujo masico en el intercambiador de calor.....</i>	59
3.5.3.2.	<i>Trabajo neto realizado por el ciclo combinado de potencia.....</i>	60
3.5.3.3.	<i>Eficiencia térmica del ciclo combinado de potencia.....</i>	60
3.5.3.4.	<i>Potencia generada por el ciclo combinado de potencia.....</i>	60

3.6.	Simulación.....	61
3.6.1.	<i>Diseño del compresor</i>	61
3.6.2.	<i>Diseño de horno de combustión</i>	62
3.6.3.	<i>Diseño de la turbina de gas</i>	63
3.6.4.	<i>Diseño del intercambiador de calor 1</i>	64
3.6.5.	<i>Diseño de la turbina de vapor</i>	65
3.6.6.	<i>Diseño del intercambiador de calor 2</i>	66
3.6.7.	<i>Diseño de la bomba 1</i>	67
3.6.8.	<i>Diseño de la torre de enfriamiento</i>	68
3.6.9.	<i>Diseño de la bomba 2</i>	69
3.6.10.	<i>Diseño del mix 1</i>	70
3.7.	Resultados.....	73
3.7.1.	<i>Resultados obtenidos con datos climáticos de temperatura y presión atmosférica del aire en costa, sierra, y oriente recogidos del INAMHI 2018, tomando en cuenta las temperaturas mínimas y máximas promedio de cada región.</i>	73
3.8.	Análisis de resultados	77
	<i>Conclusiones.....</i>	82
	<i>Recomendaciones.....</i>	83

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Temperatura mínima y máxima de la Región Costa.....	19
Tabla 2-1: Temperatura mínima y máxima de la Región Sierra.....	20
Tabla 3-1: Temperatura mínima y máxima de la Región Amazónica.....	20
Tabla 1-3: Condiciones Meteorológicas del Cantón Riobamba.....	24
Tabla 2-3: <i>Ecuaciones establecidas para el modelo de cálculo en el compresor.....</i>	27
Tabla 3-3: <i>Ecuaciones establecidas para el modelo de cálculo en la cámara de combustión.....</i>	27
Tabla 4-3: <i>Ecuaciones establecidas para el modelo de cálculo en la turbina.....</i>	28
Tabla 5-3: <i>Ecuaciones establecidas para el modelo de cálculo en las bombas e intercambiadores de calor.....</i>	28
Tabla 6-3: Herramientas básicas de la Base de simulación (Simulación Basis Manager).....	29
Tabla 7-3: Potencia consumida por el compresor calculada vs. Potencia consumida por el compresor mediante simulación variando temperatura y presión del aire al ingreso del compresor...	69
Tabla 8-3: Calor consumido por la cámara de combustión calculado utilizando gas natural como combustible vs. Calor consumido mediante simulación variando temperatura y presión del aire al ingreso del compresor.	69
Tabla 9-3: Calor consumido por la cámara de combustión utilizando gas natural como combustible vs. Temperatura del aire a la entrada de la cámara de combustión.	70
Tabla 10-3: Potencia generada por la turbina de gas calculada vs. Potencia generada por la turbina de gas mediante simulación utilizando gas natural como combustible.....	70
Tabla 11-3: Potencia consumida por la bomba 1 calculada vs. Potencia consumida por la bomba 1 mediante simulación variando la eficiencia de la bomba.....	70
Tabla 12-3: Potencia generada por la turbina de vapor calculada vs. Potencia generada por la turbina de vapor mediante simulación variando la relación de compresión.....	71
Tabla 13-3: Eficiencia calculada vs. Eficiencia del ciclo combinado de potencia mediante simulación variando la temperatura y presión del aire al ingreso del compresor.....	71
Tabla 14-3: Potencia generada por el ciclo combinado calculada vs. Potencia generada mediante simulación.....	71

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Diagrama Presión Vs Temperatura	8
Figura 2-1: Diagrama Presión Vs Volumen	8
Figura 3-1: Diagrama Temperatura Vs Entropía.....	9
Figura 4-1: Central hidroeléctrica natural.....	11
Figura 5-1: Central hidroeléctrica de reserva	12
Figura 6-1: Central termoeléctrica convencional.....	13
Figura 7-1: Diagrama T-s del ciclo combinado Brayton-Rankine.....	14
Figura 8-1: Esquema básico de un ciclo combinado.....	15
Figura 9-1: Esquema del primer ciclo combinado para la generación de potencia.	16
Figura 1-3: Georreferenciación del laboratorio de computación de la facultad de Ciencias de la ESPOCH	23
Figura 2-3: Algoritmo para la selección del paquete de fluidos	36
Figura 3-3: Algoritmo para la selección del paquete de fluidos	36
Figura 4-3: Paquete de fluidos para cada componente.....	37
Figura 5-3: Representación gráfica del difusor en el simulador.....	38
Figura 6-3: Representación gráfica del compresor en el simulador.....	38
Figura 7-3: Representación gráfica del horno de combustión en el simulador.....	38
Figura 8-3: Representación gráfica del horno de combustión en el simulador.....	39
Figura 9-3: Representación gráfica del intercambiador de calor en el simulador.....	39
Figura 10-3: Representación gráfica de la torre de enfriamiento en el simulador.....	40
Figura 11-3: Representación gráfica de la bomba en el simulador.....	40
Figura 12-3: Descripción general del ciclo combinado de potencia.....	42
Figura 13-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida del compresor.....	62
Figura 14-3: Flujo másico y flujo de energía a la salida de la cámara de combustión.....	63
Figura 15-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida de la turbina de vapor.....	64
Figura 16-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida del primer intercambiador de calor	65
Figura 17-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida de la turbina de vapor.....	66
Figura 18-3: Flujo másico y flujo de energía para las corrientes de salida del intercambiador de calor 2.....	67
Figura 19-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida del difusor 1.....	68

Figura 20-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida de la torre de enfriamiento...	69
Figura 21-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida de la bomba 2.....	70
Figura 22-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida del mix 101	71
Figura 23-3: Resultados de condiciones de operación en el simulador para cada componente.....	72

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3: Curva Eficiencia Vs Flujo de alimentación	78
Gráfico 2-3: Curva Eficiencia Vs Temperatura de alimentación.....	78
Gráfico 3-3: Curva Eficiencia según el tipo de combustible utilizado Vs Temperatura de alimentación.....	80
Gráfico 4-3: Curva Eficiencia del ciclo Vs Temperatura de alimentación.....	81

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

W_{eg} = Trabajo generado por el compresor

h_2 = Entalpía del aire a la salida del compresor

h_1 = Entalpía del aire a la entrada del compresor

ε_{Cg} =Eficiencia del compresor

W_{egs} =Trabajo isotrópico del compresor

\hat{w}_{eg} =Potencia del compresor

m_g =Flujo másico de aire

r_p =Relación de compresión

P_2 =Presion del aire a la salida del compresor

P_1 =Presión del aire a la entrada del compresor

q_1 =Calor absorbido por la cámara de combustión

h_3 =Entalpía del aire a la salida de la cámara de combustión

h_{2a} = Entalpía isotrópica del aire a la entrada de la cámara de combustión

m_b =Cantidad de combustible requerido

q_1 =Calor absorbido por la cámara de combustión

$\Delta_c H^0$ =Entalpia de formación para la reacción de combustión

W_{sg} =Trabajo generado por la turbina de gas

h_4 = Entalpía del aire a la salida de la turbina de gas

ε_{Tg} =Eficiencia de la turbina de gas

W_{sgs} =Trabajo isotrópico de la turbina de gas

h_3 = Entalpía del aire a la entrada de la turbina de gas

h_{4a} =Entalpía isotrópica del aire a la salida de la turbina de gas

\hat{w}_{sg} =Potencia de la turbina de gas

$\frac{m_v}{m_g}$ =Relacion de flujos másicos

h_5 =Entalpia del gas a la salida del intercambiador de calor

h_{3v} =Entalpía del vapor a la salida del intercambiador de calor

h_{2v} =Entalpia del vapor a la entrada del intercambiador de calor

W_{mg} = Trabajo neto del ciclo de gas

M_{gr} = Eficiencia ciclo de gas

\hat{w}_{mg} =Potencia del ciclo de gas

W_{mg} = Trabajo neto del ciclo de gas

r_{bw} =Rendimiento de trabajo

W_{sv} = Trabajo generado por la turbina de vapor
 h_{4v} = Entalpía del vapor a la salida de la turbina de vapor
 ε_{TV} = Eficiencia de la turbina de vapor
 \hat{w}_{sv} = *Potencia de la turbina de vapor*
 m_v = Flujo másico de vapor
 W_{Dv} = Trabajo realizado por la bomba
 V_{1v} = Volumen específico del líquido saturado al ingreso de la bomba
 P_{2v} = Presión del fluido a la salida de la bomba
 P_{1v} = Presión del fluido a la entrada de la bomba
 ε_b = Eficiencia de la bomba
 \hat{w}_B = Potencia de la bomba
 q_3 = Calor que ingresa al ciclo de vapor
 W_{mv} = Trabajo neto del ciclo de vapor
 W_{sv} = Trabajo generado por la turbina de vapor
 M_{vr} = Eficiencia ciclo de vapor
 \hat{w}_{mv} = Potencia del ciclo de vapor
 m_v = Flujo másico de vapor
 W_T = Trabajo neto del ciclo combinado de potencia
 W_{mg} = Trabajo neto del ciclo de gas
 y = Relación de flujos másicos
 ε = Eficiencia del ciclo combinado de potencia
 q_1 = Calor que ingresa a la cámara de combustión
 \hat{w}_c = Potencia producida por el ciclo combinado de potencia
 \hat{w}_{sv} = *Potencia de la turbina de vapor*
 \hat{w}_{eg} = *Potencia del compresor*

INDICE DE ANEXOS

Anexo A. Propiedades de gas ideal del aire.

Anexo B. Agua saturada

Anexo C. Vapor de agua sobrecalentado

Anexo D. Temperatura de llama adiabática de los combustibles más utilizados

RESUMEN

La presente investigación busca determinar la influencia que tienen las variables de entrada en un ciclo combinado de potencia para la generación de electricidad mediante la utilización de un simulador. Para ello se comparó las temperaturas mínimas y máximas que alcanza cada región natural del Ecuador, así como la presión atmosférica de dicha región, para determinar su influencia en el rendimiento del sistema, las variables de entrada se las fijo: temperatura a la salida de la cámara de combustión fue igual a la temperatura de flama adiabática referencial, temperatura a la salida de la turbina de gas: 1179°C , temperatura de gases de escape en intercambiador de calor: 488.5°C , relación de flujo de vapor por flujo de aire: 0.17 kg/s , temperatura y presión al ingreso de la turbina de vapor: 1151°C y 450 psi de presión., temperatura a la salida de la turbina de vapor: 121.3°C y una presión de 30 psi .

Posterior se realizó la simulación, obteniendo finalmente un ciclo combinado de potencia que genera 899.2 KW , utilizando metano como combustible alcanzando una eficiencia del 50% . Esta eficiencia aumenta a medida que aumenta el flujo de alimentación del aire al compresor, y a medida que la temperatura ambiente del aire de alimentación disminuye. Siendo las variables más influyentes: presión y temperatura del aire al ingreso del compresor, combustible utilizado en la cámara de combustión, relación de compresión, presión del fluido al ingreso de la turbina de vapor, así como su temperatura, y presión del fluido al ingreso del intercambiador de calor.

Palabras clave: <INGENIERIA Y TECNOLOGIA QUIMICA>, <TECNOLOGIA DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES>, <CICLO COMBINADO DE POTENCIA> <TERMOELÉCTRICAS> <GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD> <VARIABLES DE DISEÑO> <CÁLCULOS DE INGENIERÍA> <SIMULADOR DE PROCESOS>

ABSTRACT

The present research aims to determine the influence of the input variables in a combined power cycle for the generation of electricity through the use of a simulator. For this, the minimum and maximum temperatures reached by each natural region of Ecuador were established, as well as the atmospheric pressure of said region, engineering calculations were made to know the value of the design variables, obtaining as follows:

Air temperature at the combustion chamber outlet: 1963 C, temperature at the gas turbine outlet: 1179 C, exhaust gas temperature in heat exchanger: 488.5 C, steam flow rate by air flow: 0.17 kg/s, temperature and pressure at the inlet of the steam turbine: 1151 C and 450 psi of pressure, temperature at the outlet of the steam turbine: 121.3 C and a pressure of 30 psi.

Followed the simulation with these variables taking into account the thermodynamic considerations, finally obtaining a combined power cycle that generates 899.2 Kw with a calculation base of 1 Kg / s of dry air, using methane as fuel reaching an efficiency of 50%. This efficiency increases as the air supply flow to the compressor is increased, and at a lower ambient air temperature. The most influential variables are: pressure and air temperature at the compressor intake, fuel used in the combustion chamber, compression ratio, fluid pressure at the entrance of the steam turbine, as well as its temperature, and fluid pressure upon entry of the heat exchanger.

Keywords: <CHEMICAL TECHNOLOGY AND ENGINEERING >, <INDUSTRIAL PROCESS TECHNOLOGY>, < POWER COMBINED CYCLE> <THERMOELECTRIC PLANTS> <GENERATION OF ELECTRICITY> <DESIGN VARIABLES> <ENGINEERING CALCULATIONS> <PROCESS SIMULATOR>

CAPITULO I

1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Identificación del Problema

Según datos del Balance Nacional de Energía Eléctrica (2017) el Ecuador produce 8015,19 MW de potencia total para el consumo local y de exportación. Siendo 58.82% de energía renovable distribuida en: 56.33% hidráulica, 0.26% eólica, 0.33% fotovoltaica, 1.8% biomasa y 0.09 biogás. Y no renovables 41.18%, dividida en: 23.92% térmica MCI, 11.92% térmica turbo gas y 5.76% térmica turbo vapor. Por motivos de crecimiento poblacional en el Ecuador el consumo de energía ha sufrido un aumento en el uso nacional de 22733.22 GWh, repartida en: 32% consumo residencial, 16.89% comercial, 24.85% industrial, 5.31% alumbrado público, 9.31% otros y 11.74% en pérdidas de energía en distribución. (CONECEL, 2011). Así tenemos que en el Ecuador se genera electricidad a través de hidroeléctricas principalmente, sin tomar en cuenta que el agua como recurso no renovable puede faltar en épocas de sequía por ejemplo, u ocurrir un estiaje de ríos impidiendo así el óptimo funcionamiento de las hidroeléctricas. Por ello se hace imprescindible crear nuevas fuentes de energía, como las termoeléctricas.

El problema de las centrales térmicas convencionales radica en el desperdicio del trabajo y calor generados por el combustible, ocasionando un flujo considerable de efluentes gaseosos a la atmosfera contribuyendo a la contaminación y además un pobre aprovechamiento de los recursos energéticos.

1.2 Justificación del proyecto

Una central térmica que opera con ciclo combinado es una alternativa eficiente ya que utiliza como fluido principal el aire atmosférico permitiendo alcanzar rendimientos superiores en torno al 60 % debido a que el calor de los gases de escape del ciclo de gas son aprovechados en la generación de electricidad del ciclo de vapor(Endesa, 2016), por lo tanto, aprovechando que el país es productor de gas natural debido a la alta cantidad de metano producido en la quema de combustibles fósiles, mediante un ciclo combinado de potencia se puede producir energía

eléctrica adicional sin generar consumo extra de combustible ya que se utiliza el calor que contienen los gases de escape de las turbinas a gas vapor en calderas recuperadoras y este producto conducido a alta presión hacia una turbina a vapor para generar trabajo adicional sin el consumo de combustible extra, reduciendo así costos de electricidad y aprovechando recursos. (Cengel, 2011).

Por lo expuesto anteriormente y con el uso de tecnología como un simulador de procesos ingenieriles, se justifica proponer la “DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE ENTRADA EN EL RENDIMIENTO DE UN CICLO COMBINADO DE POTENCIA MEDIANTE SIMULACIÓN”, dicha investigación beneficiará indirectamente a todo el país consumidor de energía eléctrica, y principalmente al sector productor de energía, ya que se pretende demostrar mediante cálculos de ingeniería y con el apoyo del simulador los beneficios de utilizar gas natural como combustible en la producción de energía frente a la cantidad de energía producida, así como también conocer qué condiciones climáticas dentro del país son las más favorables para una producción óptima de energía mediante un ciclo combinado de potencia.

1.3 Línea base del Proyecto

1.3.1 Antecedentes de la investigación

En el Ecuador existen más de 100 centrales térmicas que utilizan diferentes combustibles, las mismas que pertenecen a diferentes empresas generadoras, y distribuidoras, entre estas tenemos: Electro Guayas, Termo Esmeraldas y Termo gas Machala, siendo actualmente las centrales termoeléctricas más importantes a nivel nacional; termoeléctrica Esmeraldas II y la central termoeléctrica Guangopolo.

La Termoeléctrica Esmeraldas II genera 96 MW de potencia y se encuentra ubicada en la Provincia de Esmeraldas, la misma que aporta a la mejora de la calidad del servicio eléctrico en la zona generando un aseguramiento del abasto de energía de acuerdo a la demanda. La generación de energía de la central termoeléctrica hasta el año 2015 es de 288.32 GWh, lo que ha contribuido a la soberanía energética. (Electricidad, 2018).

La Termoeléctrica Guangopolo II genera 50 MW de potencia, se ubica en la provincia de Pichincha la cuál se encuentra funcionando desde noviembre del año 2014, generando 390WGh/año. (CONECEL, 2011).

Los combustibles como fuentes de energía primaria que se utilizan en las industrias dentro de la matriz energética de Ecuador son: petróleo en un 88%; gas natural en 5%; hidráulica en 4%; productos de caña 2%; leña 1% y en eólica y solar en un porcentaje de 0,03%. (CONECEL, 2011).

De acuerdo a los combustibles los más utilizados son el diésel, seguido de la gasolina, el fuel oil, el GLP. (CONECEL, 2011).

En las últimas décadas las investigaciones sobre ciclos combinados de potencia en el mundo han sido variadas, así tenemos:

Serapio Quillos Ruiz (2006) realizó el diseño de una central térmica de ciclo combinado para el abastecimiento de energía en Chimpote-Perú, la misma que tiene una potencia de 100 MW cubriendo la demanda de las tres principales empresas de la región: Compañía Minera Antamina, Compañía Minera Barrica y Empresa Sider Perú. Dicha central tendría dos unidades turbo gas, dos generadores de vapor recuperadores de calor y una turbina de gas. Utilizando gas natural como combustible y alcanzando una eficiencia del 53.53%.

Por otro lado Antonio José Rovira de Antonio (2004) en su tesis doctoral: DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA CARACTERIZACIÓN TERMO ECONÓMICA DE CICLOS COMBINADOS DE TURBINAS DE GAS Y DE VAPOR EN CONDICIONES DE CARGA VARIABLE concluye que la temperatura en los gases de escape de la turbina es importante, es necesario que estos sean elevados para producir más vapor, deduce también que la turbina seleccionada debe considerarse desde un punto de vista termo económico y para una potencia dada, siendo la más óptima aquella que tenga una mayor temperatura de entrada y una mayor relación de compresión.

1.3.2. Marco Conceptual

1.3.2.1 Programa Simulador

(Marquez, 2014, p. 20): “Es un software informático de simulación muy completo, que permite diseñar procesos termodinámicos, químicos y diferentes operaciones unitarias. Actualmente es preciso que ingenieros químicos tengan conocimiento sobre el uso de dicha herramienta.

Para la simulación se debe tomar en cuenta los procesos básicos como diagramas de entrada, salida, bloques de proceso. Los cuales incluyen las principales condiciones de operación así como

los balances, hojas de datos, flujos, temperaturas, y presiones para que el software pueda realizar los debidos cálculos. Existen simuladores que poseen una amplia base de datos para todo tipo de simulación en diferentes procesos, por ejemplo, contiene más de 1500 componentes entre ellos sólidos, líquidos y gaseosos con sus respectivas propiedades fisicoquímicas en sustancias puras. (Marquez, 2014, p. 20)

Hysys es una herramienta muy utilizada para simulaciones en estado dinámico y estacionario, lo cual nos permite considerar propiedades físicas, equilibrio liquido-vapor, balances de masa y energía en distintos procesos de ingeniería química. (Marquez, 2014, p. 20)

1.3.2.2 Tipos de operaciones unitarias que contiene HYSYS

Solamente para mencionar unas cuantas operaciones unitarias dentro del área de la Ingeniería Química que puede generar la simulación del programa, se enumeran las siguientes (Marquez, 2014, p. 20):

- Acumuladores Flash
- Columnas de Destilación
- Columnas de Extracción
- Reactores Continuos y Batch
- Compresores
- Turbinas
- Bombas
- Intercambiadores de calor
- Separadores
- Mezcladores
- Controladores
- Tuberías
- Válvulas de Bloqueo y Control (Scribd, 2014)

1.3.2.3 Ventajas del Hysys

(Marquez, 2014, p. 20), entre las principales ventajas que podemos tener empleando esta herramienta están:

- Permite modificar y examinar los procesos de una planta.
- Facilita el diseño de una planta en menor tiempo.

- Mejora el diseño y optimiza las condiciones de un proceso.

1.3.2.4 Conceptos básicos de Termodinámica

Termodinámica:

La termodinámica se encarga de analizar los diferentes cambios en las magnitudes de la materia tales como: temperatura, densidad, presión, masa y volumen, tanto en sistemas abiertos como cerrados. (Muldberg, 2011, p. 20)

Temperatura:

(Muldberg, 2011): “Es una magnitud que mide el calor de un cuerpo. El calor es una forma de transferir energía en determinado estado de la materia (sólido, líquido o gas), misma que está constituida por moléculas en movimiento.”

Presión:

Se define como fuerza por unidad de área de un fluido en reposo. Cuando el fluido choca contra una superficie se ejerce sobre la superficie una fuerza, la cual depende de la velocidad del fluido, es decir la fuerza es directamente proporcional a la velocidad con la que el fluido choca contra la superficie, la suma de estas fuerzas sobre un área es la presión ejercida. (Muldberg, 2011).

Volumen:

(Muldberg, 2011): “El volumen de una sustancia se define como el espacio que esta ocupa.”

Densidad:

(Muldberg, 2011): “Es la masa de un fluido por volumen ocupado.”

Entalpia:

(Muldberg, 2011): “Es la cantidad de energía que un sistema termodinámico puede intercambiar con el medio. Una entalpía negativa hace referencia a que el sistema está liberando energía hacia su

entorno, mientras una entalpía positiva indica la ganancia de energía desde el entorno hacia el sistema.”

La entalpía se representa con la letra H.

$$H = U + PV \quad Ec 1 - 1.$$

➤ **Entalpía de reacción:**

A presión constante, es el calor ganado o liberado durante una reacción química. (Muldberg, 2011).

➤ **Entalpía de formación:**

A presión constante, es el calor necesario para la formación de una mol de sustancia. (Muldberg, 2011).

➤ **Entalpía de combustión:**

A presión constante, es el calor que se libera cuando una mol de sustancia es quemada. (Muldberg, 2011).

Entropía:

(Muldberg, 2011): “Mide el nivel de desorden al interior de un sistema, dicho desorden es provocado debido a la distribución de los estados energéticos de la materia.”

Calor:

(Muldberg, 2011): “Es la cantidad de energía que un sistema intercambia con otro, o con su exterior. Pudiendo ser este calor absorbido o cedido dependiendo de la transformación que se lleve a cabo en dicho sistema, teniendo en cuenta siempre que el calor se emite desde un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura.”

Trabajo:

Se define como el total de energía cedida desde un sistema hacia otro, dicha energía resulta debido a la acción de una fuerza ejercida a través de una distancia. (Muldberg, 2011)

Potencia:

Establece la rapidez con la que es realizado un trabajo. (Muldberg, 2011).

1.3.2.5 Diagramas termodinámicos

(Satillán, 2013): “Es un diagrama que representa gráficamente las propiedades y variables termodinámicas de una o varias sustancias.”

Dentro de los tipos de diagramas termodinámicos, encontramos:

- Diagrama presión vs temperatura
- Diagrama presión vs volumen
- Diagrama de temperatura vs entropía
- Diagrama entalpia vs entropía

Diagrama presión vs temperatura.

Este diagrama se lo conoce como diagrama de fase porque en el se identifican las diferentes fases de la materia, teniendo un punto en el cual coexisten los tres estados: el Punto Triple.(Satillán, 2013, pp. 40-41)

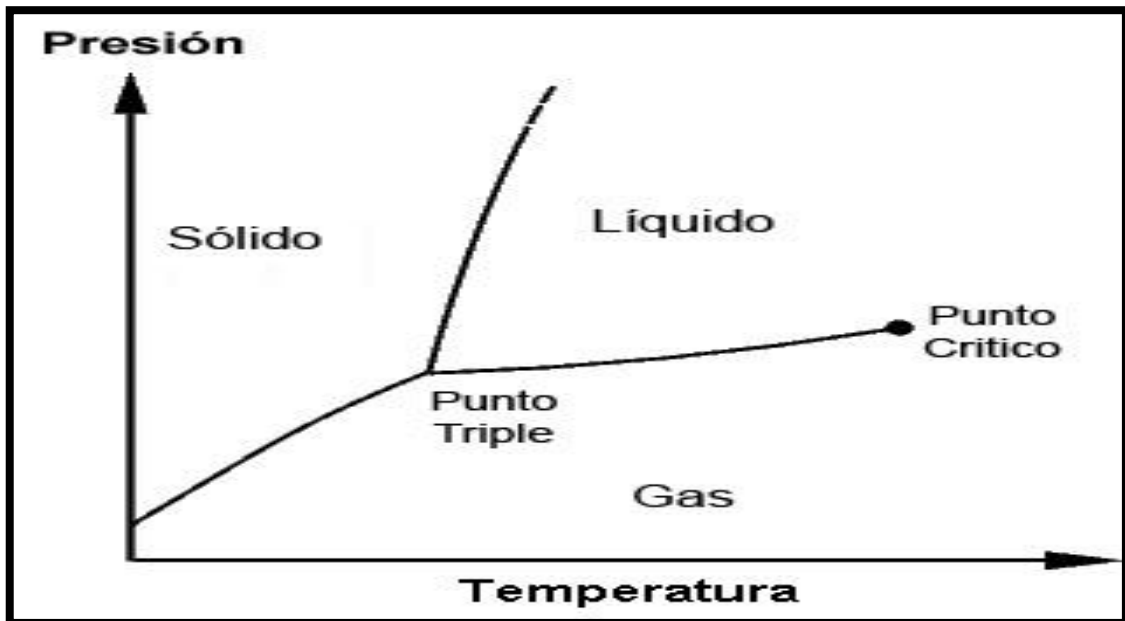


Figura 1-1: Diagrama Presión Vs Temperatura
Fuente: (Satillán, 2013)

Diagrama presión vs volumen

(Satillán, 2013, pp. 40-41), también se la conoce como diagrama de Clapeyron; donde las abscisas son los valores numéricos de temperatura del fluido que se esté analizando y en las ordenadas son valores numéricos de presión, formando una curva en la cual el área debajo de la misma representa el trabajo de sistema.

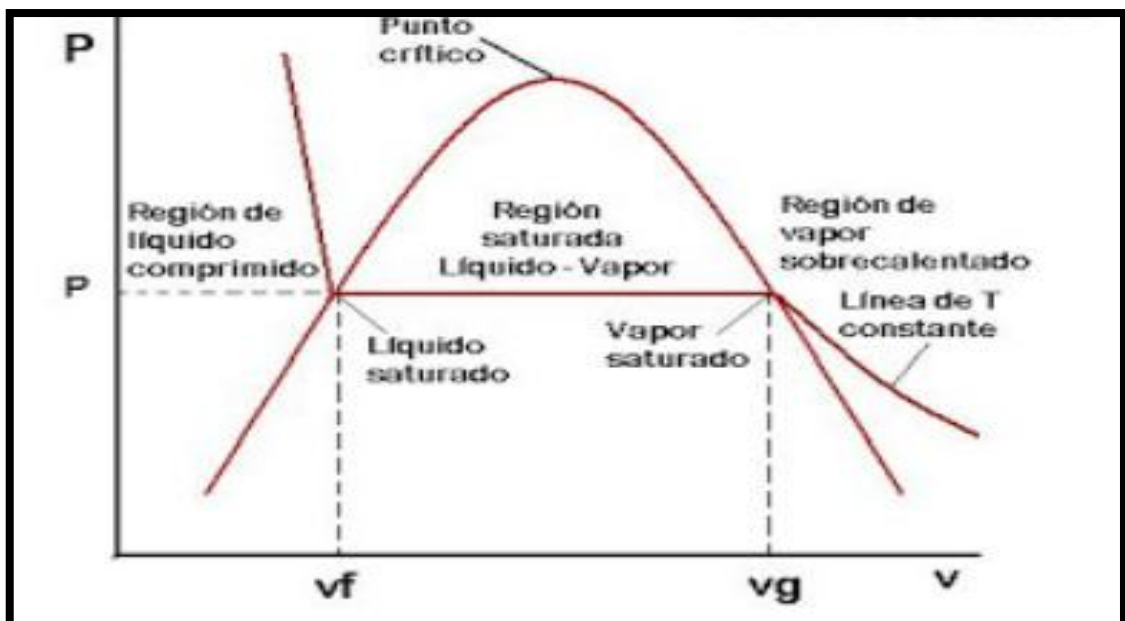


Figura 2-1: Diagrama Presión Vs Volumen
Fuente: (Satillán, 2013)

Diagrama de temperatura vs entropía

(Satillán, 2013, pp. 40-41): “El diagrama T-S se grafica en el eje de las abscisas la entropía y en el eje de las ordenadas la temperatura. Este es el llamado diagrama T-S en el cual se sitúa la entropía en el eje de abscisas y la temperatura en el de ordenadas.

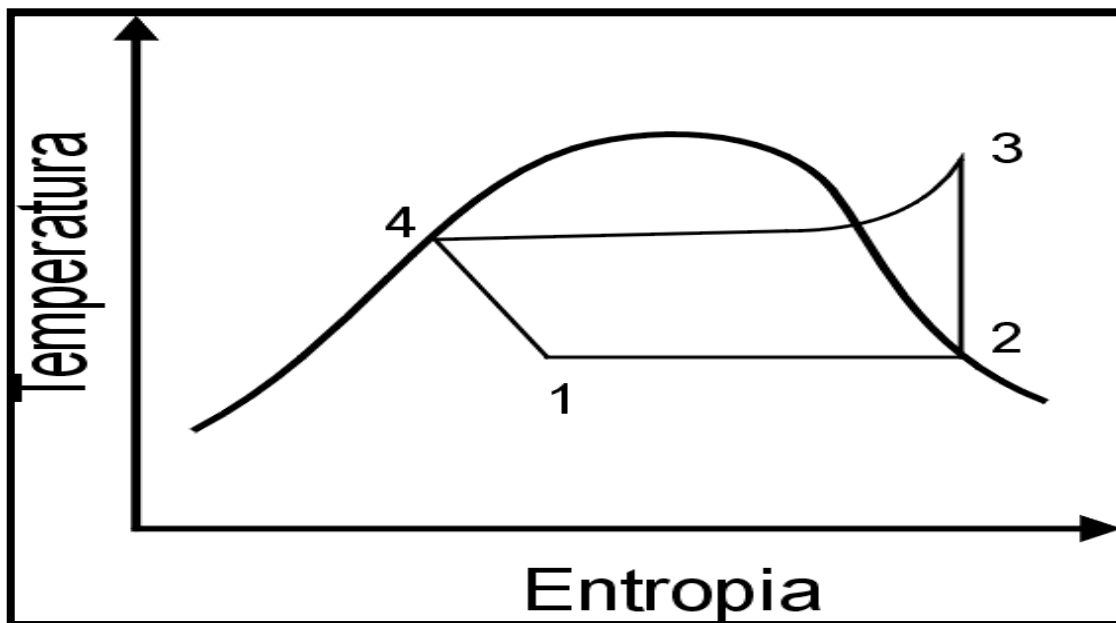


Figura 3-1: Diagrama Temperatura Vs Entropía

Fuente: (Martín, 2015)

1.3.2.6. Paquetes termodinámicos

Los paquetes termodinámicos sirven para calcular balances de masa y energía de un equipo así como también su dimensionamiento tomando en cuenta las propiedades termodinámicas y equilibrio de fase del fluido de trabajo. (Perales, 2010)

Una elección incorrecta del paquete termodinámico en la simulación invalida resultados, dicha elección depende además de la naturaleza del fluido, de la presión y temperatura del proceso que se va a simular. El método termodinámico elegido debe ser validado mediante datos experimentales para poder confiar en los resultados obtenidos por el simulador utilizando dichos paquetes. (Perales, 2010). Teniendo así los siguientes paquetes termodinámicos:

1. Ecuaciones de estado: Trabajan en un amplio rango de presión y temperatura.
2. Modelos de coeficientes de actividad: Trabajan a presiones y temperaturas bajas.
3. Modelos combinados: Combina ecuaciones de estado y modelos de coeficiente de actividad.
4. Correlaciones especiales para sistemas específicos: es decir para polímeros, aminas, etc.

A continuación se muestra las propiedades termodinámicas que se calculan para cada unidad de proceso:

Tabla 1-1: Propiedades termodinámicas para cada unidad de proceso

PROPIEDAD	CÁLCULO	EJEMPLO DE UNIDADES DE PROCESO
Coefficientes K	Equilibrio Líquido-Vapor, Líquido-Líquido	Destilación, extracción L-L
Entalpía	Balances de energía	Intercambiadores de calor y reactores
Entropía	Trabajo y eficiencias	Bombas, compresores, turbinas
Energía libre de Gibbs	Equilibrio químico	Reactores
Densidad	Caudal volumétrico	Tuberías, reactores, columnas, etc
Viscosidad	Caída de presión	Intercambiadores de calor, tuberías, etc.

Fuente: (Perales, 2010)

Datos que disponen los simuladores para cada paquete termodinámico.

- ✓ Base de datos para componentes puros: pueden ser parámetros dependientes como la presión y temperatura, o datos como valores críticos, puntos de ebullición, etc.
- ✓ Base de datos para mezclas multicomponentes: aquí se cuenta con parámetros de interacción determinados experimentalmente para equilibrios de fase de mezcla.
- ✓ Métodos de estimación: algunos métodos termodinámicos son capaces de determinar las propiedades de componentes puros conociendo la estructura molecular y grupo funcional de los compuestos, esto cuando no se conocen parámetros para la modelación.

Tipo de paquete termodinámico según la naturaleza del fluido

- Fluidos puros y mezclas de moléculas apolares (hidrocarburos): Para su modelado las Ecuaciones de estado son las más óptimas.
- Moléculas polares (alcoholes, ácidos, bases, agua): Para la fase líquida se utilizan los métodos de coeficiente de actividad y para la fase de vapor las ecuaciones de estado.
- Mezcla de sustancias apolares y ligeramente polares: Se utilizan las ecuaciones de estado modificadas.

1.3.3 Centrales generadoras de energía

Grishin (2008) dice que: “El objetivo de las centrales eléctricas es convertir la energía mecánica en energía eléctrica, aplicando otras fuentes de generación mecánica naturales o adecuadas para facilitar el proceso. Existen varios tipos de centrales eléctricas, a continuación se describen las más importantes”:

1.3.3.1. Central hidroeléctrica

Generalidades

La central hidroeléctrica funciona gracias al movimiento de la turbina causado por un chorro de agua con una velocidad adecuada que ayuda a generar energía eléctrica. Se aprovechan fuentes naturales, como las cascadas o los desniveles en los ríos, y fuentes artificiales, como la construcción de presas. (Grishin, 2008, pp. 200-220).

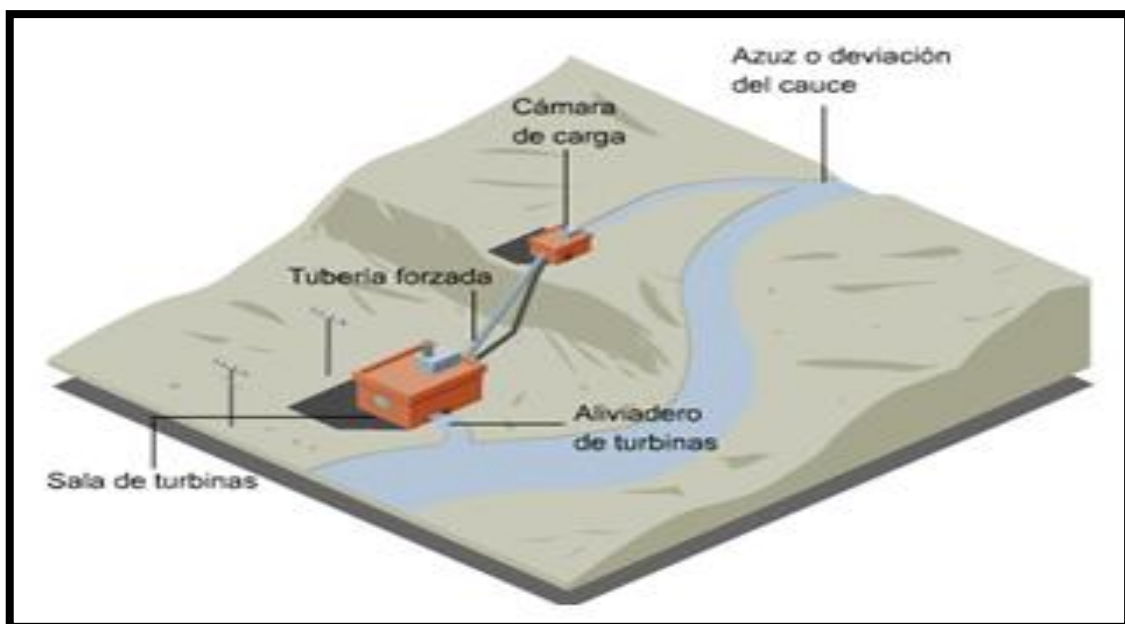


Figura 4-1: Central hidroeléctrica natural
Fuente: (Eroski, 2001)

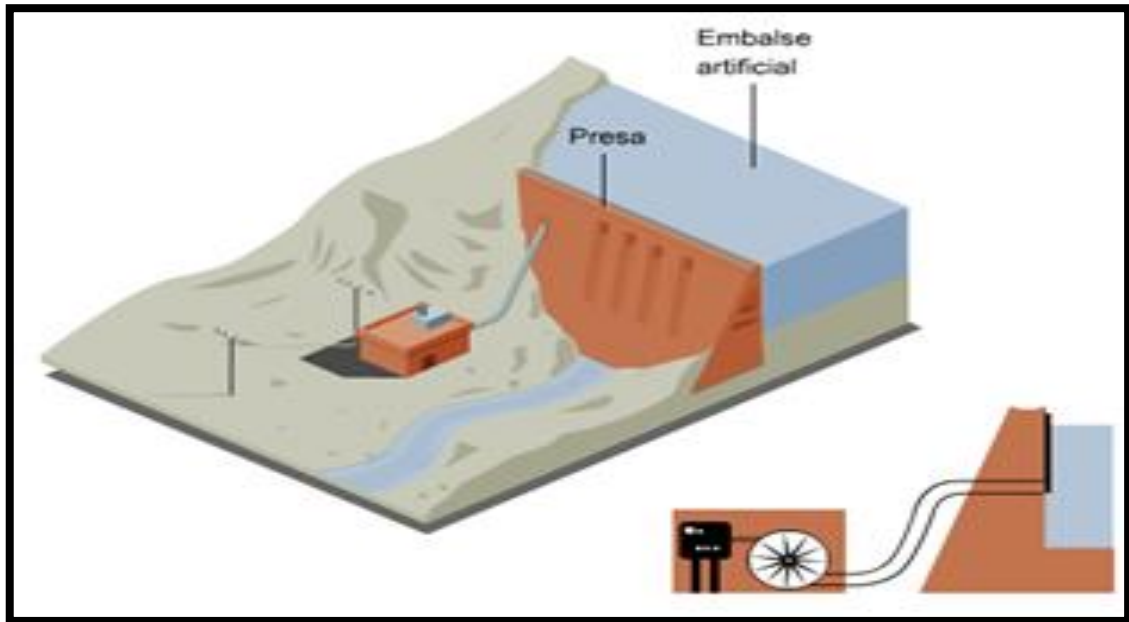


Figura 5-1: Central hidroeléctrica de reserva

Fuente: (Eroski, 2001)

1.3.3.2. Central termoeléctrica

Generalidades

Las centrales termoeléctricas convencionales producen electricidad teniendo como materia de combustión combustibles fósiles como carbón, fuel-oil o gas natural. El combustible se quema en la caldera, lo que provoca que se desprenda la energía calorífica que contiene. (Angulo, 2009, p. 358).

Esta energía calorífica se usa para calentar agua y transformarla en vapor a una presión y temperatura muy elevadas. A su vez, el vapor a elevada presión y temperatura transfiere su energía haciendo girar una turbina y un alternador para que este produzca electricidad. La electricidad generada pasa por un transformador para aumentar su tensión y así transportarla a distancia reduciendo las pérdidas en los cables conductores. (Angulo, 2009, p. 358).

(Angulo, 2009, p. 358): “El vapor que sale de la turbina después de haber cedido en ella su energía es recuperado en un condensador para convertirlo de nuevo en agua y así retornarlo a la caldera para empezar un nuevo ciclo de producción de vapor.”

La central térmica de ciclo combinado es la que utiliza de forma conjunta dos máquinas generadoras aprovechando dos veces la energía contenida en los gases de combustión:

- Una turbina de gas que aprovecha directamente los gases generados por la combustión del gas natural mezclado con aire.
- Una turbina de vapor que utiliza los gases que ya han realizado trabajo en la turbina de gas, y que todavía son capaces de generar vapor para impulsar la turbina asociada al generador.

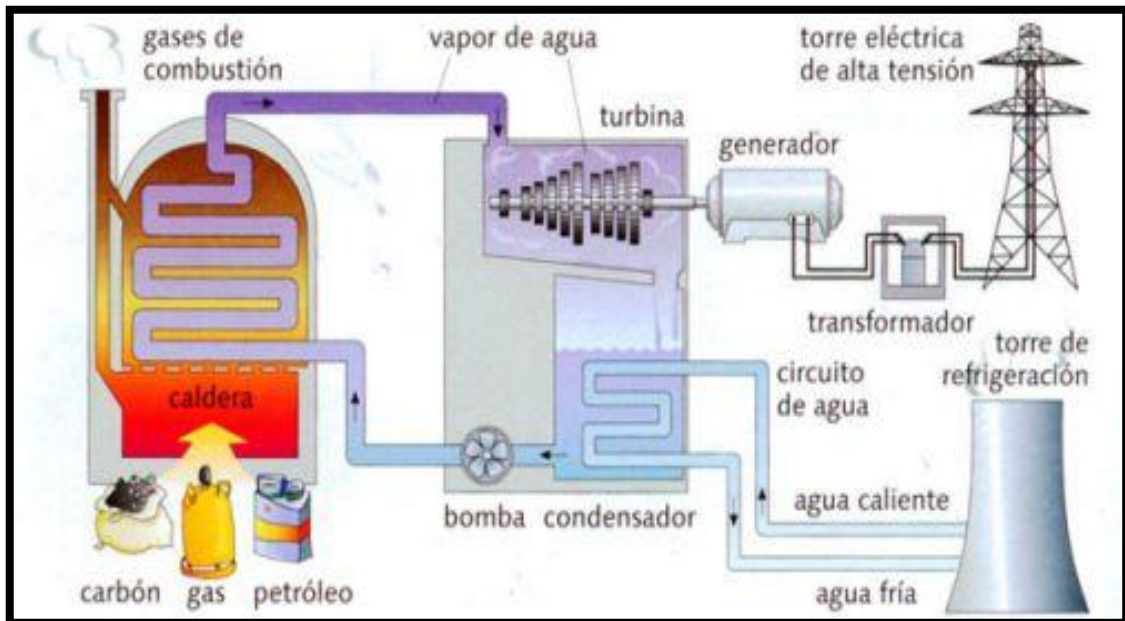


Figura 6-1: Central termoeléctrica convencional

Fuente: (Angulo, 2009)

Cabe mencionar que este ciclo combinado al utilizar carbón o petróleo como combustible genera la emisión de CO_2 , contribuyendo al efecto invernadero. Este factor ha dado un tema de investigación para mejorar el proceso y encontrar fuentes alternativas para reemplazar el combustible. (Angulo, 2009, p. 358).

Tipos de Termoeléctricas según el combustible utilizado.

- Termoeléctricas de carbón.- Carbón
- Termoeléctricas de fuel.- Fuel oil
- Termoeléctricas de ciclo combinado.- Utiliza carbón preparado, gas natural o gasóleo.
- Termoeléctricas de biomasa.- residuos vegetales
- Termoeléctricas de residuos.- residuos sólidos urbanos.
- Termoeléctricas solares térmicas.- Paneles solares

1.3.3.3 Ciclos de potencia

El tema de generación de energía aplicando un ciclo combinado, tiene su objetivo en el aprovechamiento de la energía calorífica de los gases de escape de las turbinas de combustión, para optimizar la eficiencia del proceso de generación de energía eléctrica, en casos de instalaciones para este fin, o para procesos industriales en los que se necesita suministrar calor. Básicamente los sistemas combinados utilizan dos ciclos de generación de potencia, entre ellos uno de nivel superior (ciclo Brayton), que cede energía al otro ciclo de nivel inferior (ciclo Rankine). Se toma en cuenta este procedimiento para aprovechar la energía suministrada por el combustible en el nivel superior. (Pelster, 2001, pp. 717-726).

A continuación, se muestra el diagrama T-s de los dos ciclos (Brayton y Rankine) cuando se da la recuperación de energía para cederla desde el ciclo de nivel superior al ciclo de nivel inferior:

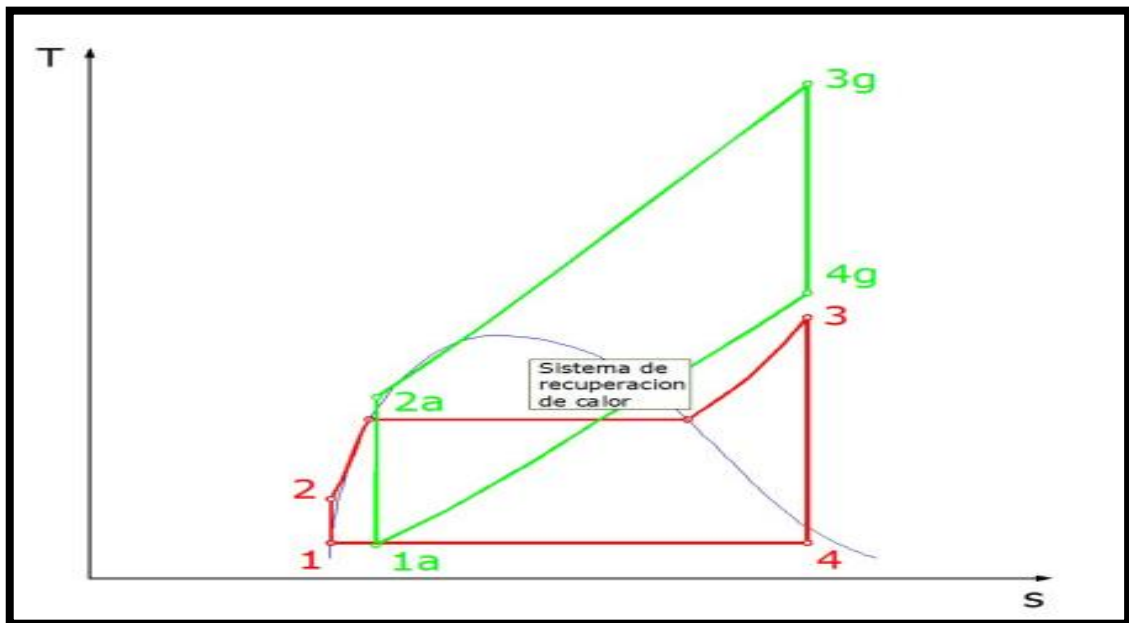


Figura 7-1: Diagrama T-s del ciclo combinado Brayton-Rankine

Fuente: (Martín, 2015)

La gran aceptación del ciclo combinado de gas y vapor en centrales termoeléctricas ha generado que se considere el avance y la mejora tecnológica en las áreas y componentes que forman parte del mismo. Los fluidos de trabajo para el ciclo combinan generalmente aire y vapor, los mismos que, a diferencia de otros fluidos (vapor de potasio, fluidos orgánicos, vapor de mercurio, etc.), son más baratos y no son tóxicos, además que se encuentran en gran cantidad en el planeta.

Los ciclos combinados aire-vapor se aplican a nivel industrial ya que alcanzan una eficiencia térmica muy alta, gracias a que el calor desechado por el ciclo Brayton a cierta temperatura es utilizado para el funcionamiento del ciclo Rankine. (Rapún, 1995, p. 20)

Además, los componentes o equipos son manejados y construidos de manera constante por muchos fabricantes, dejando de ser un impedimento su implementación. (Mendoza, 2002, pp. 15-18)

Básicamente el ciclo combinado que se expone está compuesto por una turbina de gas (ciclo Brayton) al que se le aporta todo el combustible como fuente de calor, una caldera de recuperación de calor y un ciclo de vapor (Ciclo Rankine).

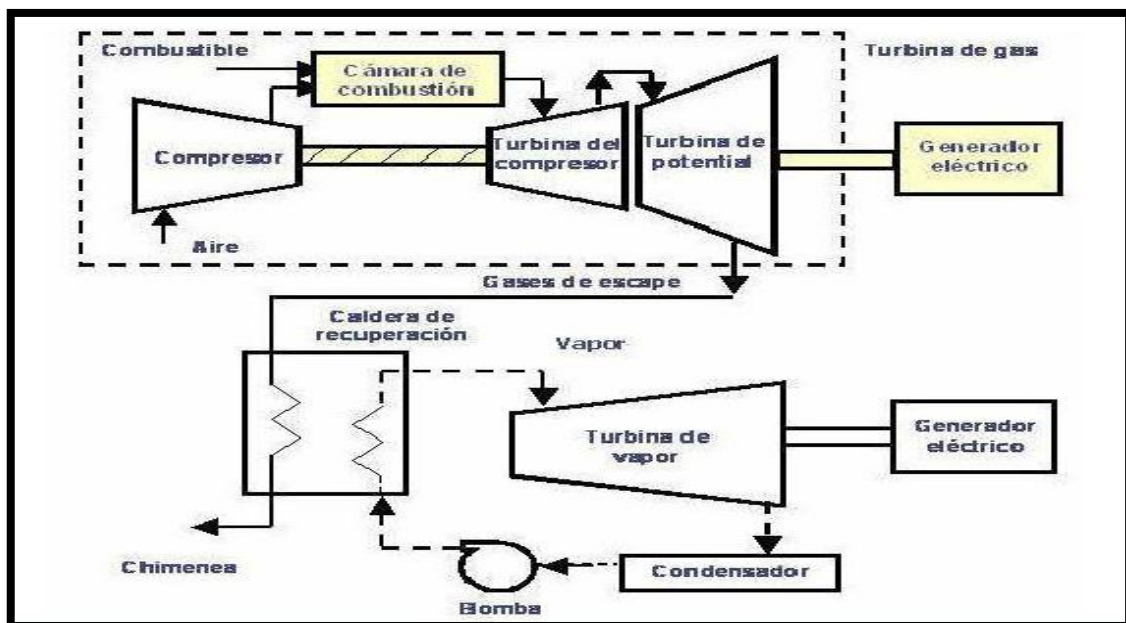


Figura 8-1: Esquema básico de un ciclo combinado

Fuente: (Rovira, 2004)

(Rheinboldt, 1974, pp. 30-40): “La caldera de recuperación de calor es el principal conector entre los dos ciclos pues el calor obtenido del ciclo de gas se transfiere al agua del ciclo de Rankine para producir el vapor en las condiciones deseadas.”

En un principio se suponía que la potencia que generaba la turbina era un tercio del total y que el resto aportaba el ciclo de vapor, con esto se conseguía un aumento de eficiencia del 40%. Actualmente, y con los avances tecnológicos en esa área se puede aumentar la eficiencia en un 60%, o más. (Rovira, 2004, p. 280)

1.3.3.4. Antecedentes históricos del ciclo combinado de potencia

La presentación del primer prototipo del ciclo combinado de gas-vapor se realizó en el año de 1949 en los Estados Unidos utilizando una turbina a gas de 3.5 MW, la misma que alimentaba con su desprendimiento de calor a una unidad de vapor convencional de 35 MW. Entre los años 1950 y 1960 se realizó varias adaptaciones del sistema, acoplados en calderos convencionales, en las que los gases de escape de las turbinas a gas se utilizaban como aire de combustión en los calderos, aumentando la eficiencia en un 5-6% de la planta de vapor tradicional. (Rovira, 2004, p. 280)

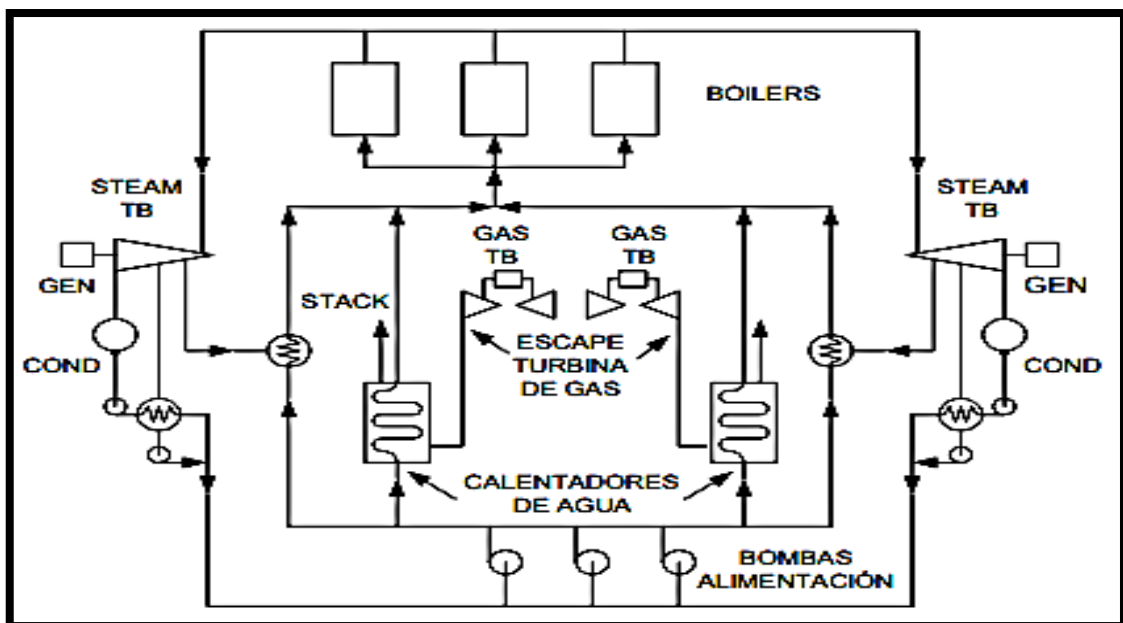


Figura 9-1: Esquema del primer ciclo combinado para la generación de potencia.

Fuente: (Mendoza, 2002)

La principal aplicación del sistema de recuperación de calor con este sistema se implementó a la industria química y petroquímica aproximadamente en los años 1970, aportando mayor eficiencia en la generación de potencia. Actualmente el ciclo combinado por recuperación de calor es el más utilizado para la generación de potencia y cogeneración. (Sabugal, 2015, p. 240).

1.3.3.5. Componentes del ciclo combinado gas-vapor

El ciclo combinado gas-vapor está compuesto generalmente por el ciclo Brayton y el ciclo Rankine, juntos generan la eficiencia más alta con respecto a su trabajo como ciclos individuales. A continuación, se describen los componentes de cada uno:

- **Ciclo Brayton**

El ciclo Brayton consta básicamente de un compresor de aire, una cámara de combustión, una turbina de gas y un generador eléctrico. En el ciclo se realizan diferentes procesos para cada etapa:

- En el compresor se da una compresión isotrópica.
- En la cámara de combustión se adiciona calor a presión constante.
- En la turbina hay una expansión isotrópica.
- En el intercambiador se da un rechazo de calor a presión constante.

La más alta temperatura se registra al final del proceso de combustión y se limita por la temperatura máxima que la turbina puede resistir, así también se limita la presión con la que puede trabajarse. El ciclo trabaja con aire, el flujo realiza importantes roles en el proceso ya que suministra el oxidante necesario para la ignición del combustible y funciona también como un refrigerante para evitar que ciertos componentes sobrepasen la temperatura a la que trabajan de manera segura. (Cengel, 2000, p. 492)

- **Ciclo Rankine**

(Cengel, 2000, p. 493): “Los componentes del ciclo de Rankine incluyen una bomba, una turbina de vapor, un condensador y el intercambiador de calor que comparte con el ciclo de Brayton. Al igual que en el ciclo anterior en cada parte se genera procesos característicos del mismo”:

- En la bomba se da una compresión isotrópica.
- En el intercambiador de calor existe una adición de calor a presión constante, procedente del ciclo de Brayton.
- En la turbina se genera una expansión isotrópica.
- En el condensador se da el rechazo del calor a presión constante.

El agua como líquido saturado que ingresa a la bomba se condensa de manera isotrópica hasta la presión en la que opera la caldera. El fluido que sale de la caldera es un vapor sobrecalentado que al ingresar en la turbina genera el giro del eje para transformar la energía mecánica a energía eléctrica, mediante un generador eléctrico. (Cengel, 2000, p. 493).

La implementación del ciclo combinado posee varias ventajas como:

- Puede operar con carga completa o cargas parciales obteniendo un mínimo de 45 % de la potencia máxima.
- Cuenta con una eficiencia elevada por un margen más amplio de potencias.
- Consume menos agua en el proceso de refrigeración.
- Ahorro de energía (combustible). (Chimbo, 2016)

1.3.4 Condiciones de operación

El Ecuador posee un clima muy variado, según las regiones: Costa, Sierra, Amazonia y Región Insular.

A continuación se describen las condiciones ambientales para cada una de las regiones naturales del Ecuador (INAMHI, 2018):

1.3.4.1 Región Costa

En la región Costa se tiene la producción de gas natural en mayor cantidad debido a que ahí se ubican las refinerías de petróleo, se generan temperaturas que oscilan entre 22°C y 28°C con una presión atmosférica 754.56 mmHg. En verano tiene una temperatura promedio de 24°C mientras que en invierno llega a una temperatura de 28°C. Otra de las características de esta región es la presencia de abundante lluvia durante los meses de Diciembre a Mayo. (INAMHI, 2018).

Tabla 2-1: Temperatura mínima y máxima de la Región Costa

CIUDAD	TEMP/MIN (° C)	TEMP/MAX(° C)
Esmeraldas	23	30
Santo Domingo de los Tsáchilas	20	27
Manta	22	27
Portoviejo	21	29
Quevedo	21	29
Guayaquil	22	29
Salinas	21	24
Machala	22	26

Temperatura promedio	21.5	27.6
-----------------------------	-------------	-------------

Fuente: (INAMHI, 2018)

1.3.4.2 Región Sierra

En la región Sierra se presenta temperaturas entre 7°C a 21°C, con una presión atmosférica de 756.81 mm Hg, lo cual asegura que el aire al ingreso del compresor no contenga demasiada humedad. El régimen de lluvia varía llegando así a 2000 mm anuales. (INAMHI, 2018).

Tabla 3-1: Temperatura mínima y máxima de la Región Sierra

CIUDAD	TEMP/MIN (° C)	TEMP/MAX(° C)
Tulcán	8	16
Ibarra	11	23
Quito	10	21
Latacunga	8	20
Ambato	9	22
Riobamba	9	20
Cuenca	12	25
Loja	12	22
Temperatura promedio	9.9	21.12

Fuente: (INAMHI, 2018)

1.3.4.3 Región Amazonia

(INAMHI, 2018): “El clima en la región Amazónica posee una temperatura que varía entre 25 °C a 38 °C con una humedad del 90% y una presión atmosférica de 630 mmHg. Siendo así esta región la más húmeda y cálida del Ecuador, por lo mismo se puede generar una considerable abundancia de lluvia que sobrepasa los 2500 mm anuales.”

Tabla 4-1: Temperatura mínima y máxima de la Región Amazónica

CIUDAD	TEMP/MIN (° C)	TEMP/MAX(° C)
Lago Agrio	22	33
El Coca	22	33
Tena	21	32
Nuevo Rocafuerte	22	34
Puyo	17	29
Macas	17	29
Zamora	17	28
Temperatura promedio	19.7	31.14

Fuente: (INAMHI, 2018)

1.3.5. Diferencia entre cálculos Manuales y Simulación

La aplicación del programa de simulación aporta ganancia de tiempo y recursos con respecto a la realización de cálculos de manera manual, ya que esta herramienta flexible aporta una combinación de fuerza y precisión gracias a los cálculos realizados en base a sus paquetes de propiedades para representarlos de manera más realista. (Tech, 1995)

(Tech, 1995): “La realización de los cálculos de manera manual al momento de diseñar un equipo, proceso u operación unitaria, puede llevar mucho tiempo al buscar las herramientas adecuadas como tablas, datos específicos de los flujos o fluidos utilizados, etc. Además, las operaciones o cálculos descritos en papel pueden generar errores sistemáticos que conlleven a un resultado inadecuado del sistema.”

El programa simulador contiene una variedad de paquetes no solo termodinámicos, si no de operaciones unitarias y procesos de ingeniería, con propiedades específicas que generan confiabilidad y precisión al momento del cálculo. La biblioteca de paquetes de datos internos aporta datos físicos y condiciones exactas de fluidos de hidrocarburos, inorgánicas y otros químicos. (Tech, 1995)

Los paquetes contenidos en el programa simulador permiten dar un funcionamiento real de un proceso o equipo dado las condiciones necesarias para las que se lo ha creado, paso que no se puede lograr sin un programa de esta gama. (Tech, 1995)

1.4 Beneficiarios directos e indirectos

1.4.1 Directos

Los beneficiarios directos del trabajo de titulación planteado son los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, permitiéndoles familiarizarse con el proceso termodinámico de un ciclo combinado de Rankine y Brayton aportando una guía en el campo del diseño y simulación.

1.4.2 Indirectos

El sector Termoeléctrico e Hidroeléctrico del país, al generar una mejor eficiencia en su producción de electricidad, esta combinación de dos tipos de generación nos permite aprovechar al máximo los combustibles utilizados, mejorando así la eficiencia térmica en todos los tipos de generación termoeléctrica.

CAPITULO II

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1. *Objetivo General*

- Determinar la influencia de las variables de entrada en el rendimiento de un ciclo combinado de potencia mediante simulación.

2.1.2. *Objetivos Específicos*

- Determinar las variables de proceso en el ciclo.
- Realizar cálculos termodinámicos del ciclo combinado.
- Realizar la simulación del ciclo combinado con dichas variables.

CAPITULO III

3.1. ESTUDIO TÉCNICO PRELIMINAR

3.1.1. Localización del proyecto

El desarrollo del proyecto se efectuó en el laboratorio de Computación de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, ubicada en la provincia de Chimborazo, cantón Riobamba en la Panamericana sur Km 1^{1/2} con coordenadas 1°39'13.4"S 78°40'34.2"W, las condiciones experimentales se detallan en la tabla 1-3 y la georreferenciación de la zona se detalla en la figura 1-3.

Tabla 1-3: Condiciones Meteorológicas del Cantón Riobamba

Parámetros	Valores Promedios
Altitud, msm.	2750
Temperatura , °C	135
Precipitación, mm/mes.	820
Humedad relativa, %.	75

Fuente: (ESPOCH, 2017).



Figura 1-3: Georreferenciación del laboratorio de computación de la facultad de Ciencias de la ESPOCH

Fuente: Google Maps

3.2 Ingeniería del proyecto

3.2.1 Tipo de Estudio

De acuerdo a la naturaleza de los datos y la recopilación bibliográfica el tipo de estudio de la presente investigación es explicativo experimental, ya que se partirá de datos conocidos acerca del funcionamiento de las termoeléctricas y conocimientos acerca de los diferentes ciclos termodinámicos para establecer relaciones de funcionamiento y eficiencia.

Como principal punto de la investigación, se busca establecer la eficiencia del ciclo combinado con relación a las diferentes temperaturas ambientales en el Ecuador, permitiendo así determinar las condiciones adecuadas para un mejor funcionamiento del ciclo aprovechando al máximo su instalación y los recursos destinados.

Además se utilizarán técnicas exploratorias para el programa computacional, permitiendo diseñar y simular el ciclo termodinámico, después con el conocimiento de termodinámica se podrá interpretar los resultados obtenidos en el programa y tener datos pragmáticos acerca del funcionamiento de las termoeléctricas.

3.3. Metodología

3.3.1. Métodos y Técnicas

3.3.1.1. Métodos

Para el desarrollo de dicha investigación se siguió las técnicas que dictan el proceso de investigación científica y los modelos que se derivan de este, para el desarrollo total de los conocimientos se aplicó el método inductivo y deductivo los cuales facilitan el orden de las ideas y la redacción técnica, luego se empleó el método experimental que permite desarrollar los conocimientos y aplicarlos en técnicas, comprobando las hipótesis que surgen del proceso de abstracción del conocimiento y permitiendo plasmar dichos conocimientos en un medio físico apto para mediciones y demostraciones prácticas.

Método Inductivo

Partiendo del conocimiento previo sobre ciclos de potencia, y principios termodinámicos se estableció las ecuaciones que permitan resolver el ciclo y determinar así la eficiencia del mismo.

Se toma en cuenta la variación de temperaturas que presentan las diferentes zonas climáticas del país, pudiendo así observar, experimentar y comparar como estas afectan en la eficiencia energética del mismo. Planteándose como hipótesis la relación existente entre la temperatura de alimentación y la eficiencia del ciclo.

Se examinó también la influencia que tiene la presión sobre la eficiencia, para ello se realizó la simulación del ciclo; estableciéndose así relaciones entre variables y el rendimiento del mismo. Luego de determinados los rendimientos en función de dichas variables se pudo conocer, analizar, e interpretar los resultados.

Método Deductivo

Al recoger los problemas generados en la investigación y hacer una recopilación bibliográfica, se dedujo que la forma óptima de resolver el ciclo combinado de potencia de gas y vapor, es utilizar una herramienta computacional que permita simular diferentes condiciones experimentales.

Luego de establecer cómo resolver la hipótesis planteada, se fundó métodos lineales de deducción para resolver paso a paso los problemas a los cuales se enfrentó el investigador en la simulación, para esto se estableció soluciones puntuales en cada etapa de diseño y junto con datos de bibliografía se determinó las condiciones apropiadas para cada etapa del ciclo.

Método Experimental

En nuestro caso de estudio se busca determinar la influencia que tienen las variables de entrada al ciclo con la eficiencia del mismo, para lo cual es necesaria la recolección de temperaturas medias tanto máxima como mínima en cada región del país. Se experimentó mediante simulación la variación de dichas variables, teniendo como resultado las variables que aseguren el mejor rendimiento.

3.3.1.2. Técnicas

Son utilizadas con el fin de lograr los objetivos de la investigación. Se emplea el análisis de las condiciones aptas para obtener la mejor eficiencia y funcionamiento del ciclo, para ello fueron necesarias pruebas mediante cálculos a mano variando temperatura y presión de entrada tomando en cuenta los principios básicos de termodinámica y funcionamiento de un ciclo combinado, así como los fenómenos que se llevan a cabo en cada etapa.

Para el cálculo de los parámetros de estudio se utilizan las ecuaciones que se detallan a continuación, con las cuales se realizaran los cálculos para cada equipo.

Tabla 2-3: Ecuaciones termodinámicas para el modelo de cálculo en el compresor

Numero de Ecuación	Ecuación	Descripción
Ec. 1-3	$W_{eg} = \frac{(h_2 - h_1)}{\varepsilon_{cg}}$	<p>W_{eg} = Trabajo generado por el compresor (kJ/kg)</p> <p>h_2 = Entalpía del aire a la salida del compresor (kJ/kg)</p> <p>h_1 = Entalpía del aire a la entrada del compresor (kJ/kg)</p> <p>ε_{cg} = Eficiencia del compresor</p>
Ec. 2-3	$W_{egs} = h_{2a} - h_1$	<p>W_{egs} = Trabajo isotrópico del compresor (kJ/kg)</p> <p>h_1 = Entalpía del aire a la entrada del compresor (kJ/kg)</p> <p>h_{2a} = Entalpía isotrópica del aire a la salida del compresor (kJ/kg)</p>
Ec. 3-3	$\hat{w}_{eg} = W_{eg} * m_g$	<p>\hat{w}_{eg} = Potencia del compresor (KW)</p> <p>W_{eg} = Trabajo generado por el compresor (kJ/kg)</p> <p>m_g = Flujo másico de aire (kg/s)</p>

<i>Ec. 4-3</i>	$r_p = \frac{P_2}{P_1}$	<p>r_p =Relación de compresión</p> <p>P_2 =Presion del aire a la salida del compresor (psi)</p> <p>P_1 =Presión del aire a la entrada del compresor (psi)</p>
----------------	-------------------------	--

Elaborado por: Jennyfer Tibán, 2018.
Fuente: (Cengel, 2011)

Tabla 3-3: Ecuaciones termodinámicas para el modelo de cálculo en la cámara de combustión

<i>Numero de Ecuación</i>	<i>Ecuación</i>	<i>Descripción</i>
<i>Ec. 5-3</i>	$q_1 = h_3 - h_{2a}$	<p>q_1 =Calor absorbido por la cámara de combustión (kJ/kg)</p> <p>h_3 =Entalpía del aire a la salida de la cámara de combustión(kJ/kg)</p> <p>h_{2a} = Entalpía isotrópica del aire a la entrada de la cámara de combustión (kJ/kg)</p>
<i>Ec. 6-3</i>	$m_b = \frac{q_1}{\Delta_c H^0}$	<p>m_b =Cantidad de combustible requerido(mol/kg)</p> <p>q_1 =Calor absorbido por la cámara de combustión (kJ/kg)</p> <p>$\Delta_c H^0$ =Entalpia de formación para la reacción de combustión(kJ/mol)</p>

Elaborado por: Jennyfer Tibán, 2018.
Fuente: (Cengel, 2011)

Tabla 4-3: Ecuaciones termodinámicas para el modelo de cálculo en la turbina de gas

Numero de Ecuación	Ecuación	Descripción
Ec. 7-3	$W_{sg} = (h_3 - h_4) * \varepsilon_{Tg}$	<p>W_{sg} =Trabajo generado por la turbina de gas (kJ/kg)</p> <p>h_3 = Entalpía del aire a la entrada de la turbina de gas (kJ/kg)</p> <p>h_4 = Entalpía del aire a la salida de la turbina de gas (kJ/kg)</p> <p>ε_{Tg} =Eficiencia de la turbina de gas</p>
Ec. 8-3	$W_{sgs} = h_3 - h_{4a}$	<p>W_{sgs} =Trabajo isotrópico de la turbina de gas (kJ/kg)</p> <p>h_3 = Entalpía del aire a la entrada de la turbina de gas (kJ/kg)</p> <p>h_{4a} =Entalpía isotrópica del aire a la salida de la turbina de gas (kJ/kg)</p>
Ec. 9-3	$\hat{w}_{sg} = W_{sg} * m_g$	<p>\hat{w}_{sg} =Potencia de la turbina de gas (KW)</p> <p>W_{sg} = Trabajo generado por la turbina de gas (kJ/kg)</p> <p>m_g =Flujo másico de aire (kg/s)</p>

Elaborado por: Jennyfer Tibán, 2018.

Fuente: (Cengel, 2011)

Tabla 5-3: Ecuaciones termodinámicas para el modelo del intercambiador de calor

Numero de Ecuación	Ecuación	Descripción
Ec. 10-3	$\frac{m_v}{m_g} = \frac{(h_4 - h_5)}{(h_{3v} - h_{2v})}$	<p>$\frac{m_v}{m_g}$ =Relacion de flujos máscicos (kg vapor/kg gas)</p> <p>h_4 =Entalpia del gas a la entrada del intercambiador de calor(kJ/kg)</p> <p>h_5 =Entalpia del gas a la salida del intercambiador de calor(kJ/kg)</p> <p>h_{3v} =Entalpía del vapor a la salida del intercambiador de calor(kJ/kg)</p> <p>h_{2v} =Entalpia del vapor a la entrada del intercambiador de calor(kJ/kg)</p>

Elaborado por: Jennyfer Tibán, 2018.

Fuente: (Cengel, 2011)

Tabla 6-3: Ecuaciones termodinámicas para el modelo del ciclo de potencia de gas

Numero de Ecuación	Ecuación	Descripción
Ec. 11-3	$W_{mg} = W_{sg} - W_{eg}$	<p>W_{mg} = Trabajo neto del ciclo de gas(kJ/kg)</p> <p>W_{sg} =Trabajo generado por la turbina de gas (kJ/kg)</p> <p>W_{eg} =Trabajo generado por el compresor de gas (kJ/kg)</p>
Ec. 12-3	$M_{gr} = \frac{W_{mg}}{q_1}$	<p>M_{gr} = Eficiencia ciclo de gas</p> <p>W_{mg} = Trabajo neto del ciclo de gas(kJ/kg)</p>

		q_1 =Calor absorbido por la cámara de combustión (kJ/kg)
<i>Ec. 13-3</i>	$\hat{w}_{mg} = W_{mg} * m_g$	\hat{w}_{mg} =Potencia del ciclo de gas(KW) W_{mg} = Trabajo neto del ciclo de gas(kJ/kg) m_g =Flujo másico del aire(kg/s)
<i>Ec. 14-3</i>	$r_{bw} = \frac{\hat{w}_{eg}}{\hat{w}_{sg}}$	r_{bw} =Rendimiento de trabajo \hat{w}_{eg} =Potencia del compresor (KW) \hat{w}_{sg} =Potencia de la turbina de gas (KW)

Elaborado por: Jennyfer Tibán, 2018.

Fuente: (Cengel, 2011)

Tabla 7-3: Ecuaciones termodinámicas para el modelo de cálculo en la turbina de vapor

<i>Numero de Ecuación</i>	<i>Ecuación</i>	<i>Descripción</i>
<i>Ec. 15 -3</i>	$W_{sv} = (h_{3v} - h_{4v}) * \varepsilon_{Tv}$	W_{sv} =Trabajo generado por la turbina de vapor (kJ/kg) h_{3v} = Entalpía del vapor a la entrada de la turbina de vapor (kJ/kg) h_{4v} = Entalpía del vapor a la salida de la turbina de vapor (kJ/kg) ε_{Tv} =Eficiencia de la turbina de vapor

<i>Ec. 16-3</i>	$\hat{w}_{sv} = W_{sv} * m_v$	<p>\hat{w}_{sv} =Potencia de la turbina de vapor (KW)</p> <p>W_{sv} =Trabajo generado por la turbina de vapor (kJ/kg)</p> <p>m_v =Flujo másico de vapor (kg/s)</p>
-----------------	-------------------------------	---

Elaborado por: Jennyfer Tibán, 2018.

Fuente: (Cengel, 2011)

Tabla 8-3: Ecuaciones termodinámicas para el modelo de cálculo en la bomba del ciclo de potencia de vapor

<i>Numero de Ecuación</i>	<i>Ecuación</i>	<i>Descripción</i>
<i>Ec. 17 -3</i>	$W_{Dv} = \frac{V_{1v}(P_{2v} - P_{1v})}{\epsilon_b}$	<p>W_{Dv} =Trabajo realizado por la bomba(kJ/kg)</p> <p>V_{1v} =Volumen especifico del líquido saturado al ingreso de la bomba(m³/kg)</p> <p>P_{2v} =Presion del fluido a la salida de la bomba (psi)</p> <p>P_{1v} = Presion del fluido a la entrada de la bomba(psi)</p> <p>ϵ_b = Eficiencia de la bomba</p>
<i>Ec. 18-3</i>	$\hat{w}_B = m_v * W_{Dv}$	<p>\hat{w}_B =Potencia de la bomba(KW)</p> <p>m_v =Flujo másico de vapor (kg/s)</p> <p>W_{Dv} =Trabajo realizado por la bomba(kJ/kg)</p>

Elaborado por: Jennyfer Tibán, 2018.

Fuente: (Cengel, 2011)

Tabla 9-3: Ecuaciones termodinámicas para el modelo del ciclo de potencia de vapor

Numero de Ecuación	Ecuación	Descripción
Ec. 19-3	$q_3 = h_{3v} - h_{2v}$	<p>q_3 =Calor que ingresa al ciclo de vapor(kJ/kg)</p> <p>h_{3v} =Entalpía del fluido a la salida del intercambiador de calor(kJ/kg)</p> <p>h_{2v} =Entalpía del fluido a la entrada del intercambiador de calor(kJ/kg)</p>
Ec. 20-3	$W_{mv} = W_{sv} - W_{Dv}$	<p>W_{mv} =Trabajo neto del ciclo de vapor(kJ/kg)</p> <p>W_{sv} =Trabajo generado por la turbina de vapor (kJ/kg)</p> <p>W_{Dv} =Trabajo realizado por la bomba(kJ/kg)</p>
Ec. 21-3	$M_{vr} = \frac{W_{mv}}{q_3}$	<p>M_{vr} =Eficiencia ciclo de vapor</p> <p>W_{mv} =Trabajo neto del ciclo de vapor(kJ/kg)</p> <p>q_3 =Calor que ingresa al ciclo de vapor(kJ/kg)</p>
Ec. 22-3	$\hat{w}_{mv} = W_{mv} * m_v$	<p>\hat{w}_{mv} =Potencia del ciclo de vapor(KW)</p> <p>W_{mv} =Trabajo neto del ciclo de vapor(kJ/kg)</p> <p>m_v =Flujo másico de vapor (kg/s)</p>

Elaborado por: Jennyfer Tibán, 2018.

Fuente: (Cengel, 2011)

Tabla 10-3: Ecuaciones termodinámicas para el modelo del ciclo combinado de potencia

Numero de Ecuación	Ecuación	Descripción
Ec. 23-3	$W_T = W_{mg} + yW_{mv}$	<p>W_T = Trabajo neto del ciclo combinado de potencia (kJ/kg_{gas})</p> <p>W_{mg} = Trabajo neto del ciclo de gas(kJ/kg)</p> <p>W_{mv} = Trabajo neto del ciclo de vapor(kJ/kg)</p> <p>y = Relación de flujos máxicos (kg vapor/kg_{gas})</p>
Ec. 24-3	$\epsilon = \frac{W_T}{q_1}$	<p>ϵ =Eficiencia del ciclo combinado de potencia</p> <p>W_T =Trabajo neto del ciclo combinado de potencia (kJ/kg_{gas})</p> <p>q_1 =Calor que ingresa a la cámara de combustión (kJ/kg)</p>
Ec. 25-3	$\hat{w}_c = \hat{w}_{sg} + \hat{w}_{sv} - \hat{w}_B \hat{w}_{eg}$	<p>\hat{w}_c =Potencia producida por el ciclo combinado de potencia</p> <p>\hat{w}_B =Potencia de la bomba(KW)</p> <p>\hat{w}_{sv} =Potencia de la turbina de vapor (KW)</p> <p>\hat{w}_{sg} =Potencia de la turbina de gas (KW)</p> <p>\hat{w}_{eg} =Potencia del compresor (KW)</p>

Elaborado por: Jennyfer Tibán, 2018.

Fuente: (Cengel, 2011)

Siguiente, se realizó la simulación del ciclo, a continuación se detalla cada técnica que se empleará de acuerdo a la etapa de construcción de la simulación, el programa presenta un entorno interactivo que permite ir corrigiendo errores y probar el sistema hasta que se ajuste a las condiciones experimentales, a la par puede ser comparado con cálculos manuales para establecer un ciclo ideal y un ciclo real.

Base de simulación (Simulation Basis Manager)

Se establecen condiciones, se programan las unidades de flujo, se seleccionan los flujos y componentes. El contenido de la base de simulación se muestra en la tabla 11-3.

Tabla 11-3: Herramientas básicas de la Base de simulación (Simulation Basis Manager)

Herramienta	Descripción
Componentes	Permite el acceso a un Listado de Componentes asociados a un Paquete de Fluidos. Cuando se ingresa un nuevo listado de componentes o se edita el listado actual, se abre la pantalla de Listado de Componentes. Esta pantalla está diseñada para simplificar el ingreso de nuevos componentes en la simulación.
Fluid Packages	Crea y manipula todos los paquetes de fluidos existentes en el programa para la simulación. Se puede asignar un paquete de fluidos a cada uno de los diagramas y subdiagramas que correspondan a un mismo caso de simulación y seleccionar el paquete de fluidos que por efecto se instalarán automáticamente para todos los diagramas nuevos.
Component Maps	Especifica la composición a través de las fronteras de un Paquete de Fluidos.
User Property	Crea y hace uso de propiedades definidas por el usuario y las deja a disposición de un Paquete de Fluidos.

Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

➤ **Componentes**

Para iniciar la simulación, se seleccionan los componentes conocidos de una lista que brinda el programa, esta lista se encuentra en la biblioteca del sistema, para escoger el componente se tiene que tomar en cuenta el diagrama que se quiere simular y se debe elegir específicamente los componentes necesarios.

De la lista de componentes (Component Listview) se puede seleccionar todos los componentes termodinámicos haciendo “click” sobre el botón “add”, de esta lista también se pueden borrar componentes si se han seleccionado mal. Es importante establecer todos los componentes del sistema ya que esta lista queda guardada en la memoria del programa y cuando se continúa a la siguiente etapa no se puede seleccionar otro componente.

Se puede crear diferentes listas de componentes para la misma simulación, esto permite establecer las características del componente y separar a los componentes por fase, o por características permitiendo así asociar a los componentes para cada etapa de simulación y evitando que se utilice componentes en manera desordenada y errónea.

En nuestro caso se tiene como fluido de trabajo el aire y el agua, el aire es asignado al componente 1 y el agua al componente 2.

➤ Selección del paquete de fluidos

El paquete de fluidos calculara las propiedades termodinámicas y de transporte de los componentes y mezclas de simulación (entropía, entalpía, presión, temperatura, caudal, densidad, calor específico, equilibrio liquido-vapor, etc); por lo que la selección del paquete de fluidos es un paso fundamental para lograr una correcta simulación.

Para escoger el paquete de fluidos apropiados para la simulación se deben tener en cuenta las condiciones que se detallan a continuación:

- Elegir el modelo / método térmico más adecuado.
- Comparar las predicciones obtenidas con datos recopilados en bibliografía
- En caso de que los componentes elegidos no estén en la lista de componentes agregar estimaciones
- Generar datos experimentales en laboratorio si es necesario chequear el modelo termodinámico

Además de realizar los pasos anteriormente mencionados se debe verificar la naturaleza del componente si es puro o mezcla, el rango de presiones y temperaturas, y comprobar que existan datos válidos. A continuación se muestran las figuras 2-3 y 3-3 las mismas que son un algoritmo usado para poder escoger el paquete de fluido adecuado según la naturaleza del fluido.

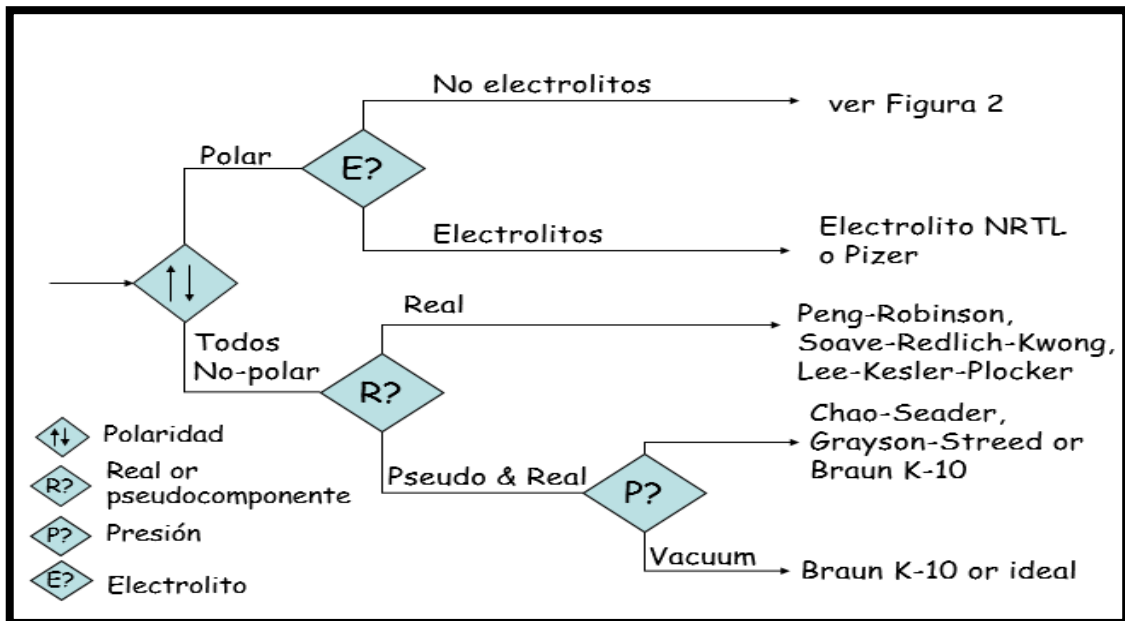


Figura 2-3: Algoritmo para la selección del paquete de fluidos

Fuente: (Carlson, 1996)

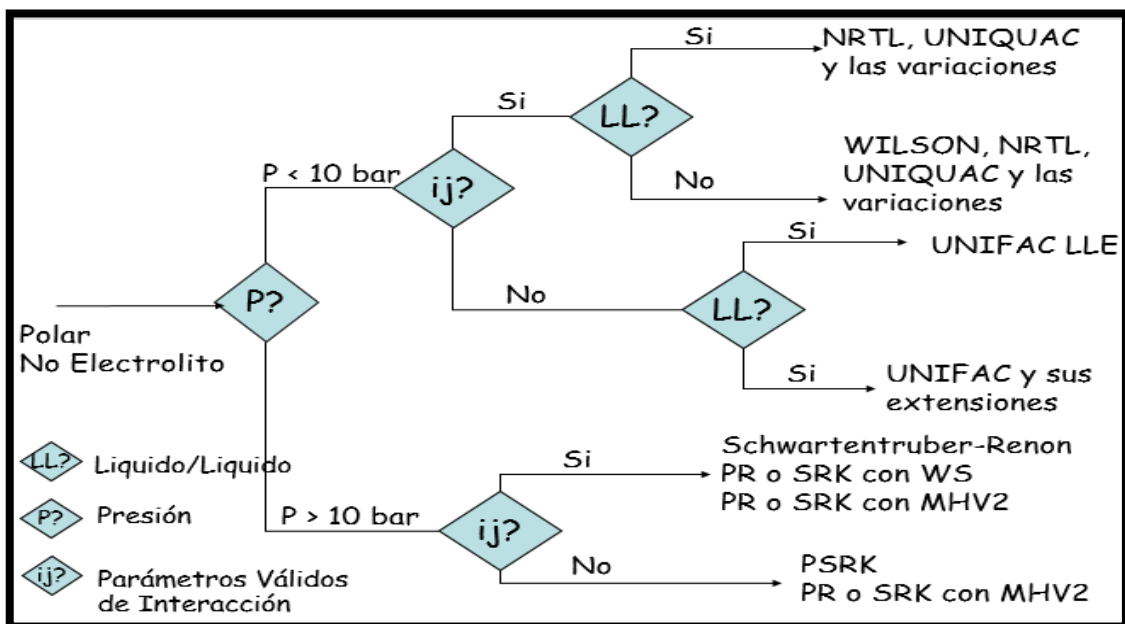


Figura 3-3: Algoritmo para la selección del paquete de fluidos

Fuente: (Carlson, 1996)

Se puede establecer diferentes paquetes de fluidos para cada lista de componentes siempre que se sigan los parámetros de diseño, en la lista de herramientas se selecciona el paquete de fluidos y se da “click” en “add” para establecer el paquete, y se cierra la ventana para proceder al entorno de simulación donde se agregan los elementos que se desean simular. Estableciendo así para el Componente1 (aire) el paquete Peng-Robinson, ya que el aire se encuentra en forma de gas y este paquete utiliza la constante de los gases, para el Componente2 (agua) se establece el paquete ASME Steam debido a encontrarse en estado líquido y ser un compuesto altamente polar. A

continuación se muestra la selección del paquete de fluidos para cada componente en el simulador, figura 4-3.

The screenshot shows a software interface with a tree view on the left and a table in the center. The tree view is expanded to 'Fluid Packages'. The table has four columns: Fluid Package, Component List, Property Package, and Status. Two rows are visible, both with 'Input Complete' status.

Fluid Package	Component List	Property Package	Status
Basis-1	Component List - 1 [HYSYS Datab	Peng-Robinson	Input Complete
Basis-2	Component List - 2 [HYSYS Datab	ASME Steam	Input Complete

Below the table is a control panel with buttons: Add (with a dropdown arrow), Edit..., Copy, Delete, Import..., and Export...

Figura 4-3: Paquete de fluidos para cada componente
Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018

Entorno de simulación (*Enter Simulation Enviroment*)

Esta es la pantalla principal donde se realiza la simulación, esta consta de una paleta de objetos, en donde se encuentran los flujos de masa (color azul) y energía (color rojo) así como también diferentes equipos de separación de fase, presión, transferencia de calor, reactores destiladores y operaciones unitarias como mezclados; y una sección lógica, en donde se encuentran equipos y dispositivos para el control del proceso.

Se introducen los siguientes dispositivos:

1. **Difusores:** Son utilizados para controlar las condiciones de velocidad de entrada del fluido, aumentando su velocidad y disminuyendo su presión estática en el sistema.

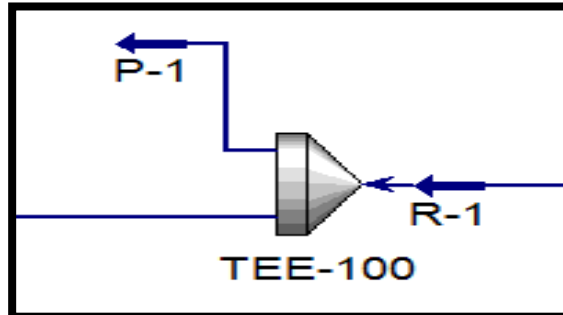


Figura 5-3: Representación gráfica del difusor en el simulador.
Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018

2. **Compresor:** Los compresores son utilizados para incrementar la presión del fluido y trasladarlo a lo largo del ciclo de potencia, en el ciclo el compresor consume trabajo de una fuente externa transfiriendo energía al fluido.

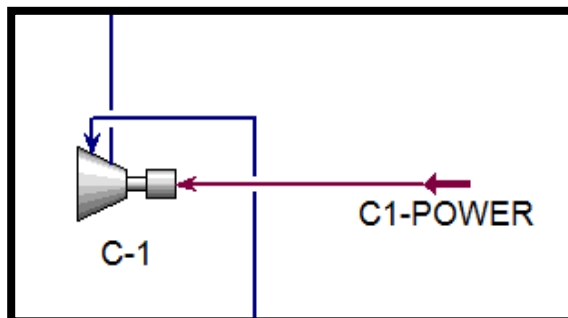


Figura 6-3: Representación gráfica del compresor en el simulador
Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018

3. **Horno de combustión:** Cámara en donde el combustible se quema, adicionando calor al fluido a presión constante.

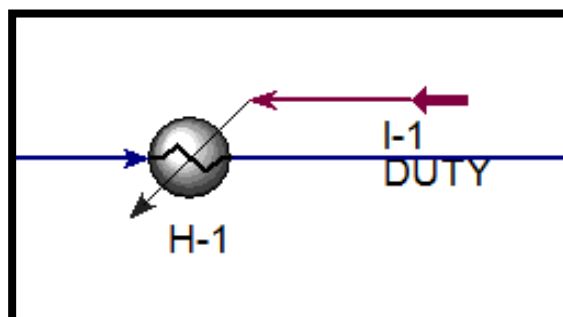


Figura 7-3: Representación gráfica del horno de combustión en el simulador.
Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018

6. **Torre de enfriamiento:** Dispositivo que disminuye eficientemente la temperatura del fluido.

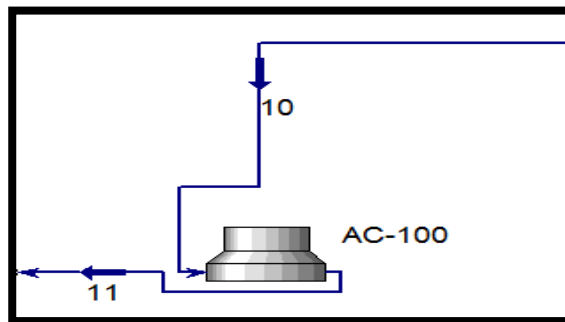


Figura 10-3: Representación gráfica de la torre de enfriamiento en el simulador.

Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018

7. **Bombas:** El fluido en ciertos puntos perderá presión y no logrará fluir con normalidad por lo que es necesario adicionar bombas para evitar pérdidas de presión y aumentar la misma para el normal transporte del fluido a lo largo del sistema.

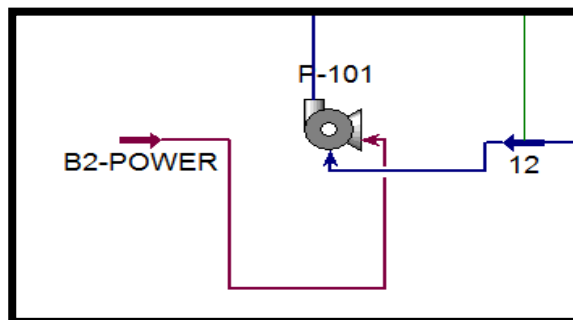


Figura 11-3: Representación gráfica de la bomba en el simulador.

Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018

Establecidos los componentes de la barra de objeto, se procede a implantar las corrientes de alimentación de materia y energía, para cada corriente es necesario ajustar las condiciones principales: presión, temperatura, fracción molar, capacidad calorífica.

A cada corriente se le debe asignar un nombre, ya que después se conectarán a los equipos y operaciones unitarias, al no nombrar las corrientes se puede tener confusiones al momento de asignar cada corriente al equipo, se puede asignar nombres numéricos o alfanuméricos de acuerdo a la comodidad del investigador.

Introducidas las corrientes de alimentación, se deben colocar los equipos que realizaran la transferencia de masa o energía, para cada caso se tiene que asignar corrientes de entrada y de salida así como también se debe establecer el orden correspondiente al diagrama de flujo del proceso, asegurándose que todos los equipos tengan corrientes de alimentación ya sea de masa o energía y corrientes de salida, para verificar el normal funcionamiento de cada equipo las flechas deben tornarse color verde.

Se procede a simular el proceso y se interpretan los resultados, después de obtener la primera simulación se pueden modificar las condiciones de los flujos de alimentación a los equipos para lograr interpretar el mejor funcionamiento del ciclo y determinar cómo el proceso se ve afectado tanto por temperaturas, presiones, y purgas.

3.4. Diseño Conceptual

Se presenta un diagrama de flujo con las operaciones unitarias y los procesos de transformación que se llevaran a cabo para el diseño del ciclo combinado de potencia de gas y vapor. En la figura 12-3 se muestra los equipos y procesos que se llevaran a cabo en la simulación.

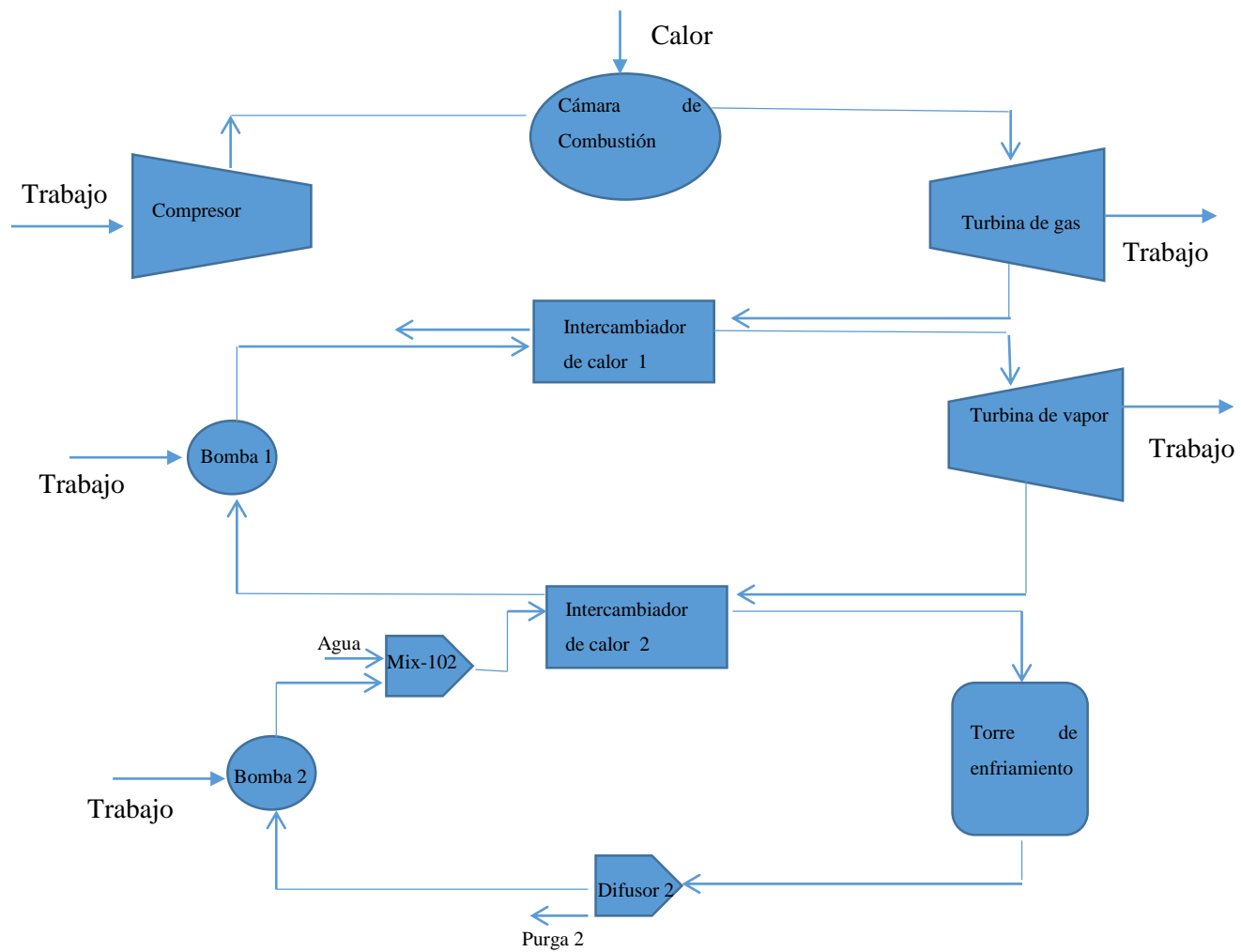


Figura 12-3: Descripción general del ciclo combinado de potencia
 Realizado por: Jennifer Tiban, 201

3.5. Cálculos de Ingeniería

3.5.1. Cálculos para el ciclo de potencia de gas

Condiciones establecidas:

$$T_1 = 9.9 \text{ C} \rightarrow 283.05 \text{ K}$$

$$P_1 = 14.6 \text{ psia}$$

$$T_3 = 1963 \text{ C} \rightarrow 2236.15 \text{ K}$$

$$r_p = 15$$

$$\varepsilon_{Cg} = 75$$

$$\varepsilon_{Tg} = 75$$

$$m_g = 1 \frac{kg}{s}$$

Según Anexo A.

Interpolando tenemos:

$$h_1 = 283.18 \frac{kJ}{kg}$$

$$P_{r1} = 1.13125$$

Si:

$$\frac{Pr_2}{Pr_1} = \frac{P_2}{P_1}$$

$$r_p = \frac{P_2}{P_1}$$

Entonces:

$$P_{r2} = r_p * P_{r1}$$

$$P_{r2} = 15 * 1.13125$$

$$P_{r2} = 16.97$$

Según Anexo A.

Interpolando tenemos:

$$T_2 = 609.7 K$$

$$h_2 = 615.13 \frac{kJ}{kg}$$

Si:

$$\frac{P_2}{P_1} = r_p$$

$$P_2 = 219 psi$$

Tenemos:

$T_3 = 2236.15 \text{ K}$ Temperatura de llama adiabática del gas natural.

Según Anexo A.

Interpolando tenemos:

$$h_3 = 2545.12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Pr_3 = 3354.23$$

Si:

$$\frac{Pr_3}{Pr_4} = \frac{P_3}{P_4}$$

$$r_p = \frac{P_3}{P_4}$$

Entonces:

$$Pr_4 = \frac{Pr_3}{r_p}$$

$$Pr_4 = \frac{3354.23}{15}$$

$$Pr_4 = 223.62$$

Según Anexo A.

Interpolando tenemos:

$$T_4 = 1183.15 \text{ K}$$

$$h_4 = 1256.45 \frac{kJ}{kg}$$

Si:

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{1}{r_p}$$

$$P_4 = \frac{P_3}{r_p}$$

$$P_4 = 14.6 \text{ psi}$$

3.5.1.1 Trabajo consumido por el compresor

$$W_{eg} = \frac{(h_2 - h_1)}{\varepsilon_{cg}}$$

$$W_{eg} = \frac{331.95 \frac{kJ}{kg}}{0.75}$$

$$W_{eg} = 442.6 \frac{kJ}{kg}$$

3.5.1.2 Temperatura del aire a la salida del compresor

$$W_{eg} = h_{2a} - h_1$$

$$h_{2a} = h_1 + W_{eg}$$

$$h_{2a} = (283.18 + 442.6) \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{2a} = 725.78 \frac{kJ}{kg}$$

Según Anexo A.

Interpolando tenemos:

$$T_{2a} = 712.95 K$$

3.5.1.3 Potencia consumida por el compresor

$$\hat{w}_{eg} = W_{eg} * m_g$$

$$\hat{w}_{eg} = 442.6 \frac{kJ}{kg} * 1 \frac{kg}{s}$$

$$\hat{w}_{eg} = 442.6 KW$$

3.5.1.4 Trabajo generado por la turbina de gas

$$W_{sg} = (h_3 - h_4) * \varepsilon_{Tg}$$

$$W_{sg} = (2545.12 - 1256.45) \frac{kJ}{kg} * 0.75$$

$$W_{sg} = 966.50 \frac{kJ}{kg}$$

Temperatura del aire a la salida de la turbina de gas

$$W_{sg} = h_3 - h_{4a}$$

$$h_{4a} = h_3 - W_{sg}$$

$$h_{4a} = (2545.12 - 966.50) \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{4a} = 1578.62 \frac{kJ}{kg}$$

Según Anexo A.

Interpolando tenemos:

$$T_{4a} = 1452.1 K$$

3.5.1.5 Potencia generada por la turbina de gas

$$\hat{w}_{sg} = W_{sg} * m_g$$

$$\hat{w}_{sg} = 966.50 \frac{kJ}{kg} * 1 \frac{kg}{s}$$

$$\hat{w}_{sg} = 966.50 KW$$

3.5.1.6 Rendimiento del trabajo en relación al compresor

$$r_{bw} = \frac{\hat{W}_{eg}}{\hat{W}_{sg}}$$

$$r_{bw} = \frac{442.6KW}{966.50KW}$$

$$r_{bw} = 0.46$$

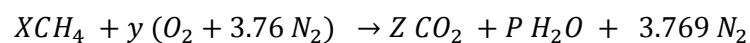
3.5.1.7 Calor absorbido por la cámara de combustión

$$q_1 = h_3 - h_{2a}$$

$$q_1 = (2545.12 - 725.78) \frac{kJ}{kg}$$

$$q_1 = 1819.34 \frac{kJ}{kg}$$

3.5.1.8 Requerimiento de combustible para la obtención de calor necesario en la cámara de combustión



Balance para el carbono:

$$X = Z$$

Balance para el oxígeno:

$$2y = 2Z + P$$

Balance para el hidrógeno:

$$4X = 2P$$

En donde:

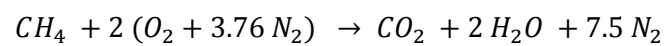
$$X=1$$

$$1 = Z$$

$$y = 2$$

$$P = 2$$

La ecuación balanceada para la combustión del metano:



El cálculo de la energía de combustión es igual a:

$$\Delta_c H^0 = (\Delta f H^0 CO_2) + 2(\Delta f H^0 H_2O) + 24.4 (\Delta f H^0 N_2) - (\Delta f H^0 CH_4) - 2(\Delta f H^0 O_2) + 7.5 (\Delta f H^0 N_2)$$

Si:

$$\Delta f H^0 CO_2 = -393.5 \frac{kJ}{mol}$$

$$\Delta f H^0 H_2O = -285.83 \frac{kJ}{mol}$$

$$\Delta f H^0 CH_4 = -2875.8 \frac{kJ}{mol}$$

Entonces:

$$\Delta_c H^0 = 1910.64 \frac{kJ}{mol}$$

Cantidad de combustible que se consumirá:

$$m_b = \frac{q_1}{\Delta_c H^0}$$

$$m_b = \frac{1819.34 \frac{kJ}{kg}}{1910.64 \frac{kJ}{mol}}$$

$$m_b = 0.95 \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$$

3.5.1.9 Trabajo neto ciclo de gas

$$W_{mg} = W_{sg} - W_{eg}$$

$$W_{mg} = (966.50 - 442.6) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$W_{mg} = 523.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

3.5.1.10 Eficiencia ciclo de gas

$$M_{gr} = \frac{W_{mg}}{q_1}$$

$$M_{gr} = \frac{523.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{1819.34 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$M_{gr} = 0.29 \text{ o } 29\%$$

3.5.1.11 Potencia producida por el ciclo de gas

$$\hat{w}_{mg} = W_{mg} * m_g$$

$$\hat{w}_{mg} = 523.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\hat{w}_{mg} = 523.9 \text{ KW}$$

3.5.2 Ciclo de potencia de vapor

Condiciones iniciales

$$P_{3v} = 450 \text{ psi}$$

$$P_{4v} = 30 \text{ psi}$$

$$\varepsilon_{Tv} = 0.99$$

$$\varepsilon_b = 0.80$$

$$\hat{w}_{sv} = 376.39 \text{ KW}$$

Estado 1

Si:

$$P_{1v} = P_{4v}$$

$$P_{1v} = 30 \text{ psi} = 0.20 \text{ MPa}$$

Según Anexo B.

Interpolando tenemos:

$$h_{1v} = h_f = 504.70 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$V_{1v} = V_f = 0.001061 \frac{m^3}{kg}$$

Estado 2

Si:

$$P_{2v} = P_{3v}$$

$$P_{2v} = 450 \text{ psi} = 3 \text{ MPa}$$

Entrada a la turbina

$$P_{3v} = 450 \text{ psi} = 3 \text{ MPa}$$

$$T_{3v} = 1151 \text{ C}$$

Según Anexo C.

Interpolando tenemos:

$$h_{3v} = 5014.42 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_{3v} = 8.68 \frac{kJ}{kg \text{ K}}$$

Salida de la turbina

Si:

$$s_{4v} = s_{3v} = 8.68 \frac{kJ}{kg \text{ K}}$$

$$P_{4v} = 30 \text{ psi} = 0.20 \text{ MPa}$$

Según Anexo B.

$$s_f = 1.5301 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$s_{fg} = 5.5970 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$h_{fg} = 2201.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

3.5.2.1 Calidad de vapor

$$S_{4v} = S_f + xS_{fg}$$

$$x = \frac{S_{4v} - S_f}{S_{fg}}$$

$$x = \frac{8.68 - 1.5301}{5.5970}$$

$$x = 1$$

$$h_{4v} = h_f + xh_{fg}$$

$$h_{4v} = 511.11 + 1 * 2201.9$$

$$h_{4v} = 2713.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

3.5.2.2 Trabajo de la turbina de vapor

$$W_{sv} = (h_{3v} - h_{4v}) * \varepsilon_{Tv}$$

$$W_{sv} = (5014.42 - 2713.01) * 0.99$$

$$W_{sv} = 2278.39 \frac{kJ}{kg}$$

3.5.2.3 Flujo másico a través de la turbina de vapor

$$\hat{w}_{sv} = W_{sv} * m_v$$

$$m_v = \frac{\hat{w}_{sv}}{W_{sv}}$$

$$m_v = \frac{376.39 \frac{kJ}{s}}{2278.39 \frac{kJ}{kg}}$$

$$m_v = 0.165 \frac{kg}{s}$$

3.5.2.4 Trabajo de la bomba

$$W_{Dv} = \frac{V_{1v}(P_{2v} - P_{1v})}{\varepsilon_b}$$

$$W_{Dv} = \frac{0.001061 \frac{m^3}{kg} (3102.64 - 206.84) kPa}{0.80}$$

$$W_{Dv} = 3.84 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{2v} = h_{1v} + W_{Dv}$$

$$h_{2v} = (504.70 + 3.84) \frac{kJ}{kg}$$

$$h_{2v} = 508.54 \frac{kJ}{kg}$$

3.5.2.5 Potencia de la bomba

$$\hat{w}_B = m_v * W_{Dv}$$

$$\hat{w}_B = 0.165 \frac{kg}{s} * 3.84 \frac{kJ}{kg}$$

$$\hat{w}_B = 0.63 MW$$

3.5.2.6 Calor que ingresa al ciclo de vapor

$$q_3 = h_{3v} - h_{2v}$$

$$q_3 = (5014.42 - 508.54) \frac{kJ}{kg}$$

$$q_3 = 4505.88 \frac{kJ}{kg}$$

3.5.2.7 Calor que sale del ciclo de vapor

$$q_4 = h_{4v} - h_{1v}$$

$$q_4 = (2713.01 - 511.11) \frac{kJ}{kg}$$

$$q_4 = 2201.9 \frac{kJ}{kg}$$

3.5.2.8 Trabajo neto ciclo de vapor

$$W_{mv} = W_{sv} - W_{Dv}$$

$$W_{mv} = (2278.39 - 3.84) \frac{kJ}{kg}$$

$$W_{mv} = 2274.55 \frac{kJ}{kg}$$

3.5.2.9 Eficiencia ciclo de vapor

$$M_{vr} = \frac{W_{mv}}{q_3}$$

$$M_{vr} = \frac{2274.55 \frac{kJ}{kg}}{4505.88 \frac{kJ}{kg}}$$

$$M_{vr} = 0.50 \text{ o } 50\%$$

3.5.2.10 Potencia del ciclo de vapor

$$\hat{w}_{mv} = W_{mv} * m_v$$

$$\hat{w}_{mv} = 2274.55 \frac{kJ}{kg} * 0.165 \frac{kg}{s}$$

$$\hat{w}_{mv} = 375.30KW$$

3.5.3 Ciclo combinado de potencia

3.5.3.1 Relación de flujos másicos en el intercambiador de calor

$$m_v(h_{3v} - h_{2v}) = m_g(h_4 - h_5)$$

$$\frac{m_v}{m_g} = \frac{(h_4 - h_5)}{(h_{3v} - h_{2v})}$$

$$\frac{m_v}{m_g} = \frac{1256.45 - 481.66}{5014.42 - 508.54}$$

$$\frac{m_v}{m_g} = 0.17 = y$$

3.5.3.2 Trabajo total del ciclo combinado de potencia

$$W_T = W_{mg} + yW_{mv}$$

$$W_T = 523.9 \frac{kJ}{kg_{gas}} + \left(0.17 \frac{kg_{vapor}}{kg_{gas}} * 2274.55 \frac{kJ}{kg_{vapor}}\right)$$

$$W_T = 910.57 \frac{kJ}{kg_{gas}}$$

3.5.3.3 Eficiencia térmica del ciclo combinado de potencia

$$\epsilon = \frac{W_T}{q_1}$$

$$\epsilon = \frac{910.57 \frac{kJ}{kg}}{1819.34 \frac{kJ}{kg}}$$

$$\epsilon = 0.50 \text{ o } 50\%$$

3.5.3.4 Potencia generada por el ciclo combinado de potencia

$$\hat{w}_c = \hat{w}_{mg} + \hat{w}_{mv}$$

$$\hat{w}_c = 523.9 \text{ MW} + 375.30 \text{ MW}$$

$$\hat{w}_c = 899.2 \text{ MW}$$

3.6. Simulación

Para la primera simulación se tomó en cuenta la temperatura mínima media de la región sierra 9.9°C y la presión atmosférica de dicha región, 14.6 psia. Así como también una relación de compresión 15 ya que según Cengel esta relación de compresión es común utilizarla en estos ciclos para generación de electricidad, se tiene además la presión de entrada a la turbina de vapor de 450 Psi y una presión de salida de 30 Psi, esto debido a que según el catálogo para turbinas de producción de electricidad mediante ciclos combinados de potencia la turbina SST-700 tiene esta capacidad. El rendimiento de cada dispositivo se detalla a continuación según datos bibliográficos que establecen dichos parámetros de funcionamiento.

2.6.1. Diseño del compresor

Condiciones de diseño

- **Componente:** Aire
- **Paquete de propiedades:** Peng-Robinson
- **Sistema de Unidades:** Sistema Inglés
- **Eficiencia:** 0.75
- **Relación de compresión:** 15

Condiciones de operación

- **Temperatura de entrada:** 9.9°C
- **Flujo másico:** 1 kg/s
- **Presión de entrada:** 14.6 psia
- **Presión de salida:** 219.7 psia

Después de determinadas las condiciones de operación para el compresor, el programa estableció los balances de materia y energía. Los mismos que se muestran en la figura 13-3.

Stream Name	2
Vapour / Phase Fraction	1,0000
Temperature [C]	439,8
Pressure [psia]	219,0
Molar Flow [lbmole/hr]	274,1
Mass Flow [kg/s]	1,000
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	617,8
Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	5330
Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	35,96
Heat Flow [kJ/h]	1,542e+006
Liq Vol Flow @Std Cond [barrel/day]	4,435e+005
Fluid Package	Basis-1
Utility Type	

Figura 13-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida del compresor
Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018

3.4.3. Diseño del horno de combustión

Condiciones de diseño

- **Combustible:** Gas natural
- **Temperatura máxima de combustión:** 1963°C
- **Paquete de propiedades:** Peng-Robinson
- **Sistema de Unidades:** Sistema Inglés

Condiciones de operación

- **Temperatura de salida:** 1963°C
- **Presión de entrada:** 219 psia

Después de establecidas las condiciones de operación para el horno de combustión, el simulador calculó los balances de materia y energía a la salida del mismo, los mismos que se muestran en la figura 14-3.

Stream Name	3
Vapour / Phase Fraction	1,0000
Temperature [C]	1963
Pressure [psia]	219,0
Molar Flow [lbmole/hr]	274,1
Mass Flow [kg/s]	1,000
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	617,8
Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	2,796e+004
Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	45,26
Heat Flow [kJ/h]	8,087e+006
Liq Vol Flow @Std Cond [barrel/day]	4,435e+005
Fluid Package	Basis-1
Utility Type	

Figura 14-3: Flujo másico y flujo de energía a la salida de la cámara de combustión.
Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

3.3.4. Diseño de la turbina de gas

Condiciones de diseño

- **Componente:** Aire
- **Paquete de propiedades:** Peng-Robinson
- **Sistema de Unidades:** Sistema Inglés
- **Eficiencia:** 0.75
- **Relación de compresión:** 15

Condiciones de operación

- **Temperatura de entrada:** 1963°C
- **Presión de salida:** 14.62 psia

Después de establecidas las condiciones de operación para la turbina de gas, el simulador calculó los balances de materia y energía a la salida del mismo, los mismos que se muestran en la figura 15-3.

Stream Name	4
Vapour / Phase Fraction	1,0000
Temperature [C]	1179
Pressure [psia]	14,60
Molar Flow [lbmole/hr]	274,1
Mass Flow [kg/s]	1,000
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	617,8
Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	1,591e+004
Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	46,96
Heat Flow [kJ/h]	4,603e+006
Liq Vol Flow @Std Cond [barrel/day]	4,435e+005
Fluid Package	Basis-1
Utility Type	

Figura 15-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida de la turbina de gas
Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

3.3.5. Diseño del intercambiador de calor 1

Condiciones de diseño

- **Componente:** Aire, Vapor de agua
- **Paquete de propiedades:** Peng-Robinson, ASME Steam
- **Sistema de Unidades:** Sistema Inglés

Condiciones de operación

- **Presión de entrada:** 14.62 psia

Después de establecidas las condiciones de operación para el intercambiador de calor, el simulador calculó los balances de materia y energía a la salida del mismo, los mismos que se muestran en la figura 16-3.

Name	4	5	2v	3v
Vapour	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000
Temperature [C]	1179	488,5	39,71	1151
Pressure [psia]	14,60	14,60	450,0	450,0
Molar Flow [lbmole/hr]	274,1	274,1	73,06	73,06
Mass Flow [kg/s]	1,000	1,000	0,1658	0,1658
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	617,8	617,8	90,31	90,31
Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	1,591e+004	5986	-1,220e+005	-8,479e+004
Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	46,96	41,84	2,441	30,58
Heat Flow [kJ/h]	4,603e+006	1,731e+006	-9,407e+006	-6,536e+006

Figura 16-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida del primer intercambiador de calor

Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

3.3.5. Diseño de la turbina de vapor

Condiciones de diseño

- **Componente:** Vapor de agua
- **Paquete de propiedades:** ASME Steam
- **Sistema de Unidades:** Sistema Inglés
- **Eficiencia:** 0.80

Condiciones de operación

- **Presión de entrada:** 450 psia
- **Temperatura de entrada:** 1151°C
- **Presión de salida:** 30 psia
- **Relación de compresión:** 15

Después de establecidas las condiciones de operación para la turbina de vapor, el simulador calculó los balances de materia y energía a la salida del mismo, los mismos que se muestran en la figura 17-3.

Stream Name	4v
Vapour / Phase Fraction	1,0000
Temperature [C]	121,3
Pressure [psia]	30,00
Molar Flow [lbmole/hr]	73,06
Mass Flow [kg/s]	0,1658
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	90,31
Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	-1,024e+005
Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	30,63
Heat Flow [kJ/h]	-7,891e+006
Liq Vol Flow @Std Cond [barrel/day]	90,22
Fluid Package	Basis-2
Utility Type	

Figura 17-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida de la turbina de vapor
Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

3.3.6. Diseño del intercambiador de calor 2

Condiciones de diseño

- **Componente:** Vapor de agua
- **Paquete de propiedades:** ASME Steam
- **Sistema de Unidades:** Sistema Inglés

Condiciones de operación

- **Presión de entrada:** 30 psi
- **Temperatura de entrada:** 121.3°C

Después de establecidas las condiciones de operación para el intercambiador de calor 2, el simulador calculó los balances de materia y energía a la salida del mismo, los mismos que se muestran en la figura 18-3.

Name	4v	1v	E-1	E-2
Vapour	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Temperature [C]	121,3	39,46	30,97	45,65
Pressure [psia]	30,00	30,00	38,00	38,00
Molar Flow [lbmole/hr]	73,06	73,06	3029	3029
Mass Flow [kg/s]	0,1658	0,1658	6,875	6,875
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	90,31	90,31	3744	3744
Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	-1,024e+005	-1,221e+005	-1,223e+005	-1,219e+005
Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	30,63	2,431	1,936	2,784
Heat Flow [kJ/h]	-7,891e+006	-9,409e+006	-3,909e+008	-3,894e+008

Figura 18-3: Flujo másico y flujo de energía para las corrientes de salida del intercambiador de calor 2

Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

3.3.7. Diseño de la bomba 1

Condiciones de diseño

- **Componente:** Vapor de agua
- **Paquete de propiedades:** ASME Steam
- **Sistema de Unidades:** Sistema Inglés
- **Eficiencia:** 0.80

Condiciones de operación

- **Presión de entrada:** 30 psi
- **Presión de salida:** 450 psi
- **Temperatura de salida:** 39.7°C

Después de la simulación se obtuvieron las condiciones de operación de la bomba 1 que se muestran en la figura 19-3.

Stream Name	2v
Vapour / Phase Fraction	0,0000
Temperature [C]	39,71
Pressure [psia]	450,0
Molar Flow [lbmole/hr]	73,06
Mass Flow [kg/s]	0,1658
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	90,31
Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	-1,220e+005
Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	2,441
Heat Flow [kJ/h]	-9,407e+006
Liq Vol Flow @Std Cond [barrel/day]	90,22
Fluid Package	Basis-2
Utility Type	

Figura 19-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida de la bomba 1
Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

3.3.10. Diseño de la torre de enfriamiento

Condiciones de diseño

- **Componente:** Vapor de agua
- **Paquete de propiedades:** ASME Steam
- **Sistema de Unidades:** Sistema Inglés
- **Temperatura de ingreso del aire:** 17°C
- **Presión del aire:** 14.6 psi
- **Temperatura de salida del aire:** 20.24 °C

Condiciones de operación

- **Temperatura de salida:** 32 °C

Después de la simulación se obtuvieron las condiciones de operación de la torre de enfriamiento que se muestran en la figura 22-3.

Stream Name	E-3
Vapour / Phase Fraction	0,0000
Temperature [C]	32,00
Pressure [psia]	18,00
Molar Flow [lbmole/hr]	3029
Mass Flow [kg/s]	6,875
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	3744
Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	-1,223e+005
Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	1,997
Heat Flow [kJ/h]	-3,908e+008
Liq Vol Flow @Std Cond [barrel/day]	3740
Fluid Package	Basis-2
Utility Type	

Figura 23-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida de la torre de enfriamiento
Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

3.3.13. Diseño de la bomba 2

Condiciones de diseño

- **Componente:** Vapor de agua
- **Paquete de propiedades:** ASME Steam
- **Sistema de Unidades:** Sistema Inglés
- **Eficiencia:** 0.75

Condiciones de operación

- **Presión de Salida:** 38 Psia
- **Temperatura de Salida:** 32°C

Después de la simulación se obtuvieron las condiciones de operación para la bomba 2, estas se muestran en la figura 25-3.

Stream Name	E-5
Vapour / Phase Fraction	0,0000
Temperature [C]	32,02
Pressure [psia]	38,00
Molar Flow [lbmole/hr]	2786
Mass Flow [kg/s]	6,325
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	3444
Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	-1,223e+005
Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	1,998
Heat Flow [kJ/h]	-3,596e+008
Liq Vol Flow @Std Cond [barrel/day]	3441
Fluid Package	Basis-2
Utility Type	

Figura 25-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida de la bomba 2
Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

3.3.8. Diseño del mix 101

Condiciones de diseño

- **Componente:** Vapor de agua
- **Paquete de propiedades:** ASME Steam
- **Sistema de Unidades:** Sistema Inglés

Condiciones del agua de enfriamiento a la entrada del mezclador

- **Temperatura:** 19°C
- **Presión:** 38 psi
- **Flujo másico:** $0.55 \frac{kg}{s}$

Condiciones de operación

- **Temperatura de entrada:** 32°C
- **Presión de entrada:** 38 Psi
- **Flujo molar:** $2786 \frac{lb\ mol}{h}$

Después de la simulación se obtuvieron las condiciones de operación del mix 101 que se muestran en la figura 21-3.

Stream Name	E-1
Vapour / Phase Fraction	0,0000
Temperature [C]	30,97
Pressure [psia]	38,00
Molar Flow [lbmole/hr]	3029
Mass Flow [kg/s]	6,875
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	3744
Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	-1,223e+005
Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	1,936
Heat Flow [kJ/h]	-3,909e+008
Liq Vol Flow @Std Cond [barrel/day]	3740
Fluid Package	Basis-2
Utility Type	

Figura 21-3: Flujo másico y flujo de energía para la corriente de salida del mix 101

Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

A continuación, se muestran los resultados de la simulación para cada componente, figura 22-3

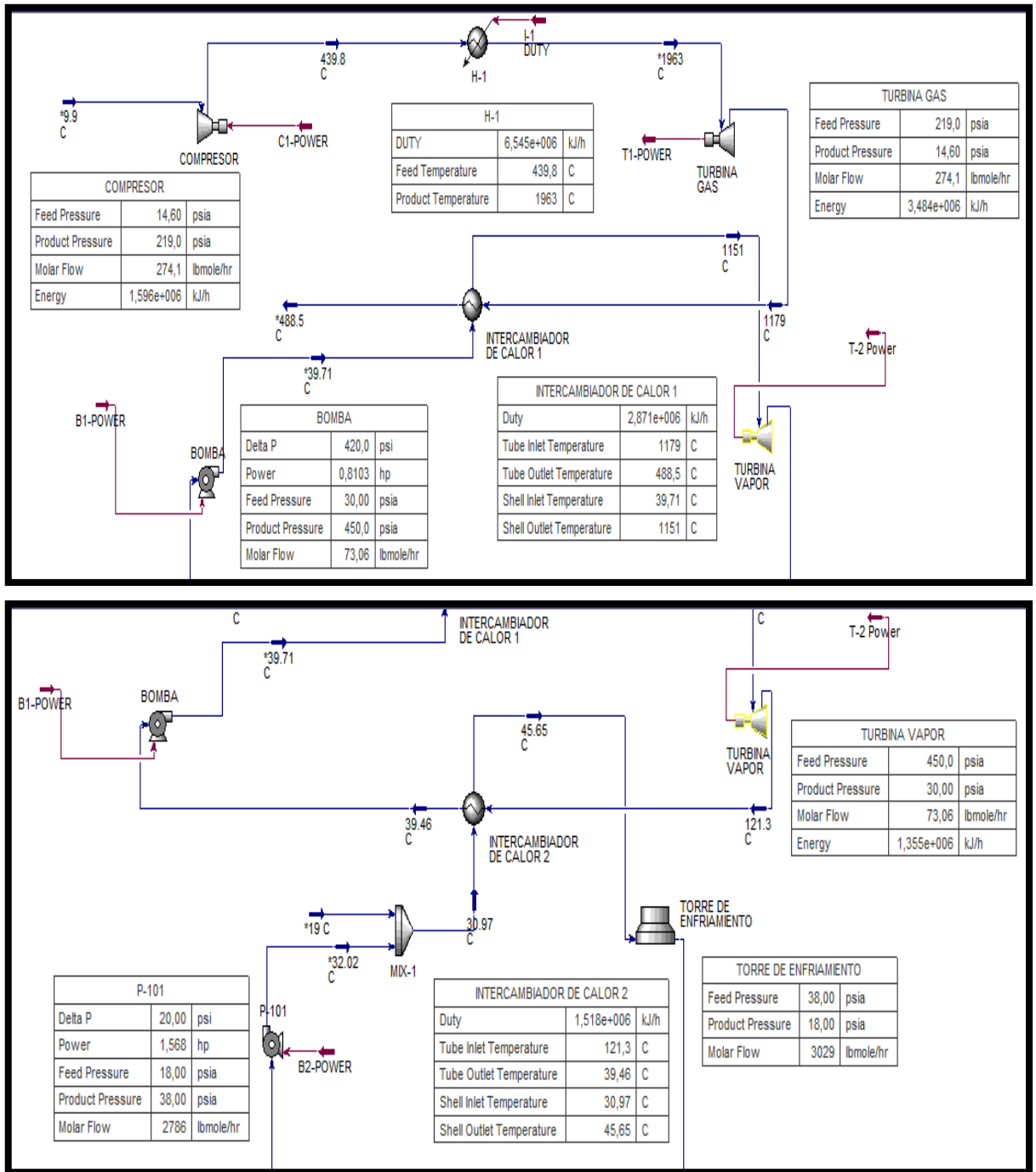


Figura 22-3: Resultados de condiciones de operación en el simulador para cada componente.

Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

3.7 Resultados

3.7.1 Resultados obtenidos con datos climáticos de temperatura y presión atmosférica del aire en costa, sierra, y oriente recogidos del INAMHI 2018, tomando en cuenta las temperaturas mínimas y máximas promedio de cada región.

Tabla 8-3. Potencia consumida por el compresor variando temperatura y presión atmosférica del aire al ingreso del compresor para cada región del país.

Región	Presión atmosférica (Psi)	Temperatura (°C)		Potencia consumida (KW)
		mínima	máxima	
Sierra	14.6	9.9	21.12	443.33
		21.12	21.5	460.55
Costa	14.7	21.5	27.6	459.44
		27.6	19.7	468.611
Oriente	12.18	19.7	31.14	503.055
		31.14		521.94

Realizado por: Jennyfer Tiban, 2018.

Tabla 9-3. Calor consumido por la cámara de combustión variando temperatura y presión atmosférica del aire al ingreso del compresor para cada región del país.

Región	Presión atmosférica (Psi)	Temperatura (°C)		Calor consumido (KW)
		mínima	máxima	
Sierra	14.6	9.9	21.12	1818.05
		21.12	21.5	1790
Costa	14.7	21.5	27.6	1790.55
		27.6		1775.55

Oriente	12.18	mínima	19.7	1748.61
		Máxima	31.14	1718.33

Realizado por: Jennyfer Tiban, 2018.

Tabla 10-3. Eficiencia producida según el combustible utilizado Vs Temperatura del aire al ingreso del compresor variando temperatura y presión atmosférica del aire al ingreso del compresor para cada región del país.

Región	Presión atmosférica (Psi)	Temperatura (°C)		Eficiencia del ciclo (%)	
				Gas natural	Metano
Sierra	14.6	mínima	9.9	49.13	49.5
		máxima	21.12	48.95	49.33
Costa	14.7	mínima	21.5	49.00	49.37
		máxima	27.6	48.90	49.28
Oriente	12.18	mínima	19.7	47.67	48.07
		máxima	31.14	47.41	47.82

Realizado por: Jennyfer Tiban, 2018.

Tabla 11-3. Potencia consumida por la bomba 1 variando temperatura y presión atmosférica del aire al ingreso del compresor para cada región del país.

Región	Presión atmosférica (Psi)	Temperatura (°C)		Potencia consumida (KW)
Sierra	14.6	mínima	9.9	0.60
		máxima	21.12	0.60
Costa	14.7	mínima	21.5	0.60
		máxima	27.6	0.60

Oriente	12.18	mínima	19.7	0.60
		máxima	31.14	0.60

Realizado por: Jennyfer Tiban, 2018.

Tabla 12-3. Eficiencia ciclo de gas utilizando metano como combustible variando temperatura y presión atmosférica del aire al ingreso del compresor para cada región del país.

Región	Presión atmosférica (Psi)	Temperatura (°C)		Eficiencia (%)
		mínima	máxima	
Sierra	14.6	mínima	9.9	28.8
		máxima	21.12	28.3
Costa	14.7	mínima	21.5	28.3
		máxima	27.6	28.1
Oriente	12.18	mínima	19.7	26.6
		máxima	31.14	25.9

Realizado por: Jennyfer Tiban, 2018.

Tabla 13-3. Potencia ciclo de gas variando temperatura y presión atmosférica del aire al ingreso del compresor para cada región del país.

Región	Presión atmosférica (Psi)	Temperatura (°C)		Potencia (KW)
		mínima	máxima	
Sierra	14.6	mínima	9.9	524.44
		máxima	21.12	507.22
Costa	14.7	mínima	21.5	508.33
		máxima	27.6	499.17
		mínima	19.7	464.72

Oriente	12.18	máxima	31.14	485.83
---------	-------	--------	-------	--------

Realizado por: Jennyfer Tiban, 2018.

Tabla 14-3. Eficiencia ciclo de vapor variando temperatura y presión atmosférica del aire al ingreso del compresor para cada región del país.

Región	Presión atmosférica (Psi)	Temperatura (°C)		Eficiencia (%)
		mínima	máxima	
Sierra	14.6	mínima	9.9	47
		máxima	21.12	47
Costa	14.7	mínima	21.5	47
		máxima	27.6	47
Oriente	12.18	mínima	19.7	47
		máxima	31.14	47

Realizado por: Jennyfer Tiban, 2018.

Tabla 15-3. Potencia ciclo de vapor utilizando metano como combustible variando temperatura y presión atmosférica del aire al ingreso del compresor para cada región del país.

Región	Presión atmosférica (Psi)	Temperatura (°C)		Potencia (KW)
		mínima	máxima	
Sierra	14.6	mínima	9.9	373.89
		máxima	21.12	373.89
Costa	14.7	mínima	21.5	373.89
		máxima	27.6	373.89
		mínima	19.7	373.89

Oriente	12.18	máxima	31.14	373.89
---------	-------	--------	-------	--------

Realizado por: Jennyfer Tiban, 2018.

Tabla 17-3. Potencia generada por el ciclo combinado

Potencia generada (KW)
899.2

Realizado por: Jennyfer Tiban, 2018.

3.8. Análisis de Resultados

3.8.1 Eficiencia del ciclo con respecto al flujo de alimentación de aire a la entrada del compresor

La curva Eficiencia vs. Flujo de alimentación se muestra en la figura 23-3, se puede observar que la eficiencia del ciclo aumenta a medida que aumenta el flujo de alimentación, el cual va de 0 a 1Kg/s, donde la eficiencia más alta se logra al alimentar un flujo de 1Kg/s, la eficiencia incrementa conforme incrementa el flujo de alimentación, esto debido a que el compresor eleva la presión inicial del gas hasta una presión final más alta que la inicial, por lo tanto según Pedro Fernandez Diez en su investigación sobre Compresores para el DEPARTAMENTO DE ENERGIA ELECTRICA Y ENERGETICA de la UNIVERSIDAD DE CANTABRIA deduce que a un mayor volumen de gas que ingrese al compresor se tiene una mayor presión a la salida del mismo elevando así la eficiencia del ciclo, sin embargo este aumento de la eficiencia es creciente hasta una alimentación de 0.6Kg/s de aire, a partir de dicho flujo hasta una alimentación de 0.8 Kg/s de aire se observa una caída en la eficiencia, esto debido a la existencia de un punto muerto.

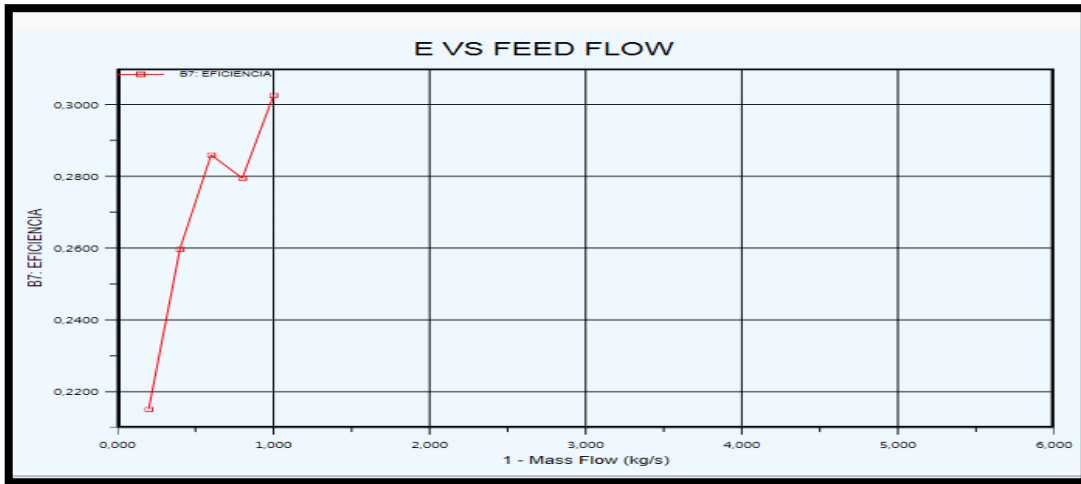


Gráfico 1-3: Curva Eficiencia Vs Flujo de alimentación

Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

3.8.2. Eficiencia del ciclo con respecto a la temperatura de alimentación de aire al compresor

En la figura 28-3; se muestra la curva Eficiencia Vs Temperatura de alimentación, donde se puede observar que a una temperatura de 31.14°C y utilizando metano como combustible se tiene una eficiencia de 47.81% mientras que a una temperatura de alimentación del aire de 9.9°C con el mismo combustible se observa una eficiencia del ciclo de 49.51%

Según Cengel (2011) los resultados de la evaluación de diferentes temperaturas del aire de alimentación al ciclo en relación a la eficiencia del ciclo térmico muestra que a menor temperatura del aire a la entrada del compresor se tiene mayor eficiencia esto debido a que el aire en presencia de calor se expande, obligando al compresor a realizar un trabajo extra, así se tiene mayor consumo de trabajo por parte del compresor.

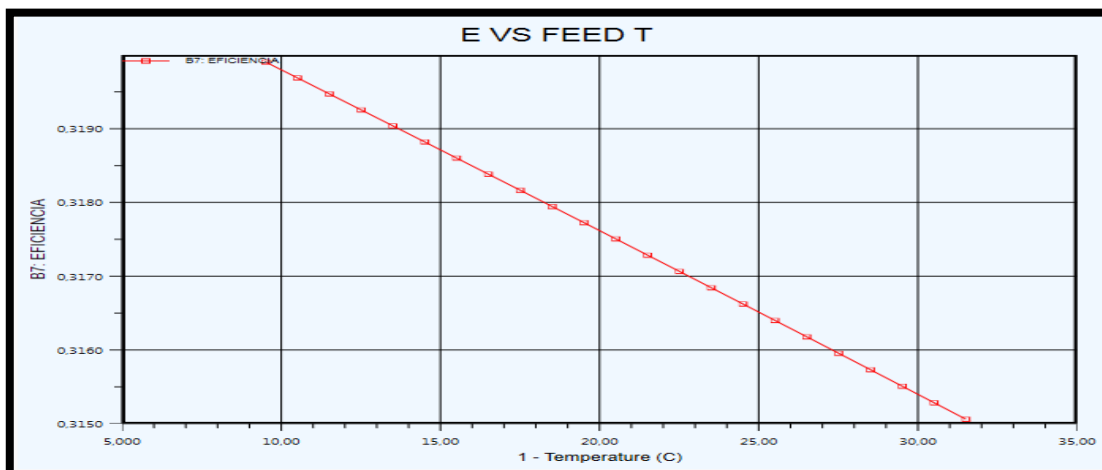


Gráfico 2-3: Curva Eficiencia Vs Temperatura de alimentación.

Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

3.8.3. Temperatura del aire al ingreso del compresor Vs Eficiencia del ciclo

Como vimos en la tabla 8-3 a 9.9°C y 14.6 psi (condiciones del aire al ingreso del compresor) y asumiendo que el aire ingresa libre de vapor, se tiene una potencia consumida por el compresor de 443.33 KW, y una eficiencia del ciclo de 49.5% , mientras que a 31.14°C y 12.18 psi se tiene una potencia consumida de 521.94 MW por el compresor, y una eficiencia de 47.81% . Si: La potencia del compresor se calcula multiplicando el flujo másico de aire que ingresa al mismo, por la diferencia entre la entalpía del fluido a la salida del compresor menos la entalpía del fluido a la entrada del mismo, se tiene que a menor temperatura a la entrada del compresor la entalpía del fluido será menor y la potencia más baja, lo que beneficia en el rendimiento de la eficiencia del ciclo, obteniendo así una eficiencia 49.50% . (Cengel, 2011)

3.8.4. Calor de combustión necesario

En la tabla 9-3 se observa que para combustionar 1Kg/s de aire, asumiendo una combustión completa del gas natural con el fin de evitar residuos de combustible sin quemar, y con una temperatura de alimentación a la cámara de combustión de 439.8°C se necesita 1818.05 kJ/s, mientras que a una temperatura de 531.4°C de alimentación a la cámara de combustión se necesita 1718.33 kJ/s, se observa como la demanda de calor aumenta a medida que la temperatura de ingreso del aire a la cámara de combustión disminuye, esto debido a que el combustible debe aportar mayor calor para combustionar el mismo flujo másico a menor temperatura de entrada. Observándose además que el calor necesario en la cámara de combustión es inversamente proporcional a la temperatura de alimentación del aire al ingreso del compresor.

3.8.5. Eficiencia del ciclo en relación al combustible utilizado

Como podemos apreciar la tabla 10-3 se tiene que a una temperatura de 9.9°C y utilizando metano como combustible se tiene una eficiencia de 49.50% , con gas natural y en las mismas condiciones una eficiencia de 49.13% . Ahora variando la temperatura de ingreso del aire al compresor a 31.14°C y utilizando los mismos combustibles se tiene una eficiencia de 47.81% para el metano, 47.4% para el gas natural.

Se obtiene una mejor eficiencia al utilizar metano como combustible dado que la temperatura de combustión del mismo es 1963°C

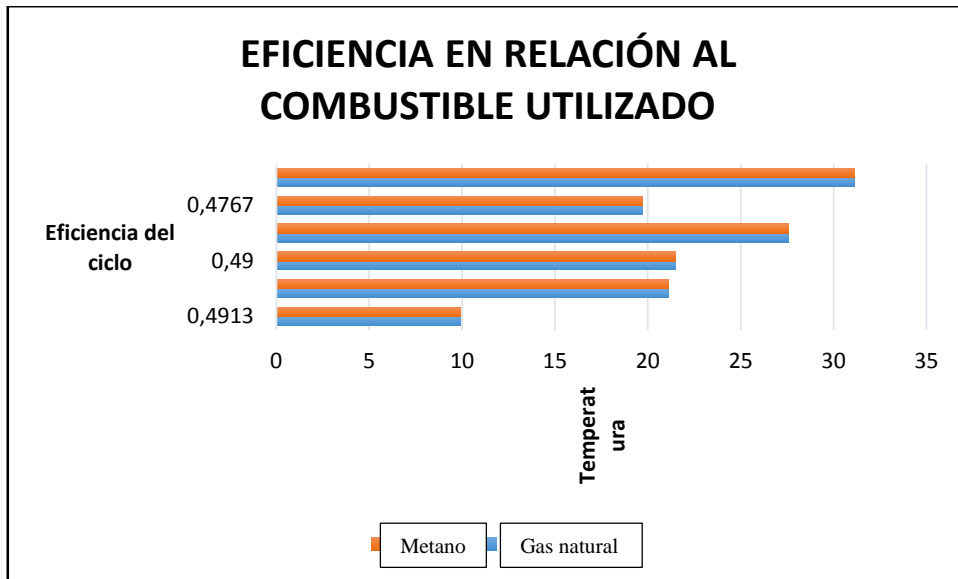


Gráfico 3-3: Curva Eficiencia según el tipo de combustible utilizado Vs Temperatura de alimentación.

Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

3.8.6. Diseño turbina de gas

Observando la tabla 11-3 se tiene que la potencia de la turbina es 967.77 KW para todas las condiciones de temperatura y presión del aire al ingreso del compresor, ya que la temperatura de ingreso a la turbina es la temperatura a la cual el combustible va a combustionar, varía así la potencia del compresor en función a la temperatura de combustión del combustible utilizado.

3.8.7. Diseño de la bomba 1

La bomba en el ciclo de vapor tiene una potencia de 0.60 MW, para alcanzar dicha potencia la bomba opera con una relación de compresión de 15, un rendimiento de 0.8 y un flujo molar del fluido de entrada de 0.16 kg/s, dicho fluido ingresa a la bomba a 39⁰ C y una presión de 30 psi, aumentando su presión a la salida de la bomba hasta 450 psi y manteniendo la temperatura de salida igual a la de entrada debido a que la bomba es un dispositivo adiabático.

3.8.8. Diseño de la turbina de vapor

La turbina de vapor trabaja con una eficiencia de 0.80, relación de compresión de 15 generando una potencia de 376.39KW, dicha turbina opera con una presión entrada del fluido de 450 psi y un flujo másico del fluido de 0.1655 kg/s.

3.8.9. Eficiencia producida por la central

Se tiene una eficiencia de 49.51% utilizando metano como combustible y condiciones de temperatura y presión de la región sierra debido a que arrojaron la mejor eficiencia. Debido a que

la temperatura del aire al ser la más baja asegurando que este aire sea más fácilmente compresible disminuyendo así el trabajo del compresor.

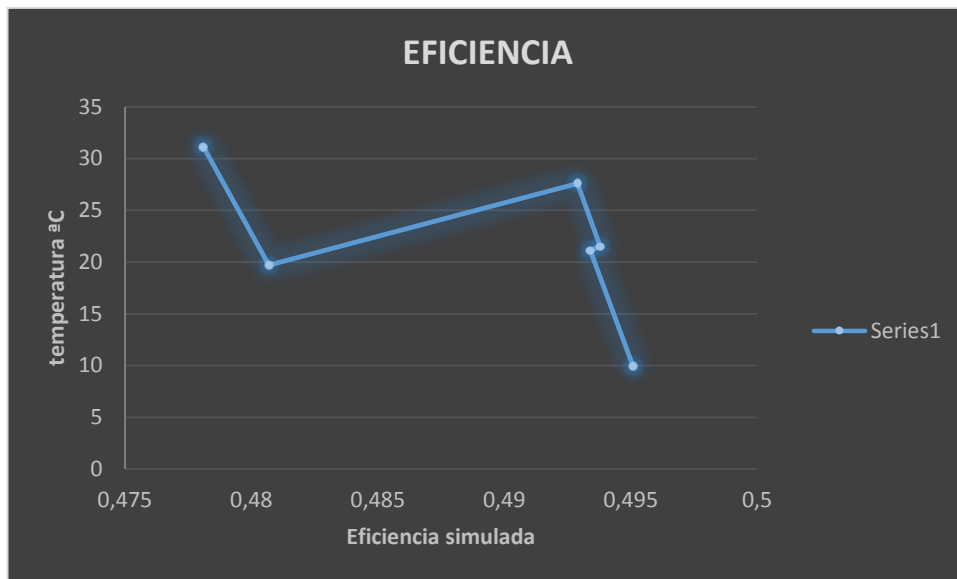


Gráfico 4-3: Curva Eficiencia del ciclo Vs Temperatura de alimentación.
Realizado por: Jennyfer Tibán, 2018.

CONCLUSIONES

- Las variables del proceso que influyen en el rendimiento del ciclo son:
Presión y temperatura del aire al ingreso del compresor, ya que a mayor temperatura del aire el rendimiento disminuye.
Flujo de alimentación del aire al compresor, a mayor flujo de alimentación la eficiencia del ciclo incrementa.
Siendo la variable más influyente la temperatura del aire al ingreso del compresor ya que esta afecta directamente a la eficiencia del mismo debido a que el aire a mayor temperatura se expande, lo que provoca mayor trabajo en el compresor.
- Al variar la presión y temperatura del aire al ingreso del compresor para cada región del Ecuador teniendo así: la región sierra una presión de 14.6 Psi y temperatura máxima de 21.12C y mínima de 9.9 C, para la región costa una presión de 14.7 Psi y temperatura máxima y mínima de 27.6 C y 21.5 C respectivamente, para la región oriente una presión de 12.18 Psi y temperatura máxima y mínima de 31.14 C y 19.7 C respectivamente, se tiene que las condiciones que generan mayor eficiencia del ciclo combinado de potencia son:
Combustible: metano, consumiendo 1818.05 kJ/s de combustible por cada kg de aire que ingresa.
Temperatura del aire a la salida de la cámara de combustión: 1963⁰ C, temperatura a la salida de la turbina de gas: 1179⁰ C
Temperatura de gases de escape en intercambiador de calor: 488.5⁰ C
Relación de flujo de vapor por flujo de aire: 0.17 kg/s
Temperatura y presión al ingreso de la turbina de vapor: 1151⁰ C y 450 psi de presión.
Temperatura y presión a la salida de la turbina de vapor: 121.3 ⁰ C y una presión de 30 psi
Temperatura de condensación del vapor de agua: 39.46 ⁰ C
Flujo másico de alimentación a la bomba del ciclo de vapor: 0.1655 kg/s.
Presión del fluido a la salida de la bomba: 450 psi
Obteniendo una eficiencia del ciclo de 49.5%

RECOMENDACIONES

- ✓ Una vez obtenido los resultados de la simulación es necesario realizar pruebas de campo en su instalación, controlando flujos y temperaturas.
- ✓ Si se desea conocer la eficiencia que se obtendría variando la temperatura del aire, es recomendable utilizar temperaturas que se encuentren dentro de las existentes en el país.
- ✓ Se recomienda siempre validar los datos obtenidos en simulación mediante cálculos manuales.
- ✓ Se debe tener en cuenta los rendimientos establecidos según bibliografía para cada dispositivo y así obtener resultados reales en la simulación.

BIBLIOGRAFIA

Algabra, María. Central térmica. [En línea] 2015. <http://asesoriagasa.blogspot.com/p/central-termica.html>.

Angulo. “*Modelos de Predespacho de Unidades de Generación.*” . Santiago de Chile : DIE, 2009.

Balance Nacional de Energía. Electricidad, Agencia de Regulación y Control. [En línea] 2017. <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/balance-nacional/>.

Carlson. “*Don't gamble with physical properties for simulations*”. Ottawa : Wiley, 1996.

Cengel. *Termodinámica.* Mexico : McGraw-Hill, 2011.

Cengel, Yunus. *Termodinámica.* quinta. s.l. : The McGraw-Hill Companies, Inc., 2000. págs. 582-589.

Chimbo, Kevin. Centrales térmicas en Ecuador. [En línea] 2016. https://issuu.com/kevinpatochimbodominguez/docs/centrales_termicas_-_ecuador_sni.do .

ESPOCH, Estación Agrometeorológica de la Facultad de Recursos Naturales. *Condiciones Experimentales del cantón RIobamba.* 2017, ESPOCH DIGITAL, págs. 5-7.

CONECEL. Estadística del sector eléctrico ecuatoriano. [En línea] 2011. www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/11/Folleto-Resumen-Estad%C3%ADsticas-2011.pdf.

Constante, Joffre. Importancia de la energía eléctrica en el cambio de la Matriz Energética en Ecuador. [En línea] <http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/Importancia-de-la-energ%C3%ADa-el%C3%A9ctrica-en-el-Cambio-de-la-Matriz-Energ%C3%A9tica-en-Ecuador.pdf> .

Agencia de regulación y control de electricidad. Producción anual de energía eléctrica a nivel nacional por tipo de fuente . [En línea] 2017. <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/produccion/>.

Endesa. Generación de energía. [En línea] 2016. <https://www.endesa.com/es/sobre-endesa/a201610-generacion-produccion-energia-electrica.html>.

- Eroski.** La energía hidráulica. [En línea] 2001.
<https://www.edu.xunta.es/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947843/contido/hidraulica.swf>.
- Grishin.** *Guidrotexnicheskiesooruzhenia*. Moscú : Energuia, 2008.
- INAMHI.** Sitiometereologico. [En línea] 19 de Junio de 2018.
<http://www.serviciometeorologico.gob.ec>.
- Marquez, Oscar.** Simulador Hysys . [En línea] 2014.
<https://es.slideshare.net/oscardmarquezduran1/simulador-hysys-diapositas>.
- Martín, Carlos.** EStudio termodinámico de una planta de ciclo combinado con turbina de gas y pre-diseño del HRSG. Leganés : s.n., 2015.
- Mendoza, Jaime.** Análisis del diseño termodinámico de centrales eléctricas de ciclo combinado. Piura : s.n., 2002.
- Ministerio de Electricidad** Energía [En línea] 19 de Junio de 2018.
<https://www.energia.gob.ec/esmeraldas/>.
- Muldberg, Golden.** *Termodinámica para Ingeniería*. Mexico : Trillas, 2011.
- Pelster.** “*The Thermoeconomic and Environomic Modeling and Optimization of the Synthesis, Design, and Operation*. Ohio : ASME, 2001.
- Perales, Ángel L. Villanueva.** ULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS. [En línea] Febrero de 2010.
<http://www.cartagena99.com/recursos/fisica/apuntes/Metodos%20termodinamicos%20en%20simuladores%20de%20proceso%2023Feb%20.pdf>.
- Proyectos.** Centrales termoelectricas. [En línea] <http://blog.espol.edu.ec/cbfalcon/centrales-termoelectricas/>.
- Rapún.** “*Comportamiento Fuera de Diseño de las turbinas de Gas*”. Mexico D.F. : NA, 1995.
- Rheinboldt.** *Methods for solving systems of nonlinear equations*. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics, 1974.
- Rovira, Antonio.** Desarrollo de un modelo para la caracterización termoeconomica de ciclos combinados de turbnas de gas y de vapor en condiciones de carga variable. Madrid : s.n., 2004.

Ruiz, Serapio Quillos. *DISEÑO DE UNA CENTRAL DE CICLO COMBINADO CON GAS NATURAL PARA CUBRIR LA DEMANDA BASE DE ENERGIA EN LA REGION CHAVIN.* Chimbote-Perú : s.n., 2006.

Sabugal, Santiago. *Centrales térmicas de ciclo combinado teoría y proyecto.* Madrid : Ediciones Díaz de Santos, S.A, 2015.

Satillán. *Termodinámica Básica.* Riobamba : SN, 2013.

Scribd. Que es Hysys. [En línea] 2014. <https://es.scribd.com/document/250238034/Que-Es-Hysys>.

Tech, Aspen. Aspen Hysys. [En línea] 1995. <https://procesosbio.wikispaces.com/file/view/54224008-HYSYS-3-2-Manual-Traslation.pdf>.

ANEXOS

Anexo A.

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324

Anexo A. (Continuación)

410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200	1800	2003.3	1310	1487.2	3.994	3.6684
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120	2100	2377.7	2559	1775.3	2.356	3.8605
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Anexo B.

Pres., <i>P</i> kPa	Temp. sat., <i>T</i> _{sat} °C	Volumen específico, <i>m</i> ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat., <i>v</i> _f	Vapor sat., <i>v</i> _g	Líqu. sat., <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Vapor sat., <i>u</i> _g	Líqu. sat., <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Vapor sat., <i>h</i> _g	Líqu. sat., <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Vapor sat., <i>s</i> _g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322

Anexo B. (continuación)

Pres., <i>P</i> kPa	Temp. sat., <i>T</i> _{sat} °C	Volumen específico, <i>m</i> ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat., <i>v</i> _f	Vapor sat., <i>v</i> _g	Líqu. sat., <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Vapor sat., <i>u</i> _g	Líqu. sat., <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Vapor sat., <i>h</i> _g	Líqu. sat., <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Vapor sat., <i>s</i> _g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439

Λ
V

Anexo C.

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
	$P = 0.01 \text{ MPa (45.81°C)*}$				$P = 0.05 \text{ MPa (81.32°C)}$				$P = 0.10 \text{ MPa (99.61°C)}$			
Sat.†	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
	$P = 0.20 \text{ MPa (120.21°C)}$				$P = 0.30 \text{ MPa (133.52°C)}$				$P = 0.40 \text{ MPa (143.61°C)}$			
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828

Anexo C. (continuación)

	$P = 0.50 \text{ MPa (151.83}^\circ\text{C)}$				$P = 0.60 \text{ MPa (158.83}^\circ\text{C)}$				$P = 0.80 \text{ MPa (170.41}^\circ\text{C)}$			
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625

	$P = 1.00 \text{ MPa (179.88 }^\circ\text{C)}$				$P = 1.20 \text{ MPa (187.96 }^\circ\text{C)}$				$P = 1.40 \text{ MPa (195.04 }^\circ\text{C)}$			
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036

Anexo C. (continuación)

	$P = 1.60 \text{ MPa (201.37 } ^\circ\text{C)}$				$P = 1.80 \text{ MPa (207.11 } ^\circ\text{C)}$				$P = 2.00 \text{ MPa (212.38 } ^\circ\text{C)}$			
Sat.	0.12374	2594.8	2792.8	6.4200	0.11037	2597.3	2795.9	6.3775	0.09959	2599.1	2798.3	6.3390
225	0.13293	2645.1	2857.8	6.5537	0.11678	2637.0	2847.2	6.4825	0.10381	2628.5	2836.1	6.4160
250	0.14190	2692.9	2919.9	6.6753	0.12502	2686.7	2911.7	6.6088	0.11150	2680.3	2903.3	6.5475
300	0.15866	2781.6	3035.4	6.8864	0.14025	2777.4	3029.9	6.8246	0.12551	2773.2	3024.2	6.7684
350	0.17459	2866.6	3146.0	7.0713	0.15460	2863.6	3141.9	7.0120	0.13860	2860.5	3137.7	6.9583
400	0.19007	2950.8	3254.9	7.2394	0.16849	2948.3	3251.6	7.1814	0.15122	2945.9	3248.4	7.1292
500	0.22029	3120.1	3472.6	7.5410	0.19551	3118.5	3470.4	7.4845	0.17568	3116.9	3468.3	7.4337
600	0.24999	3293.9	3693.9	7.8101	0.22200	3292.7	3692.3	7.7543	0.19962	3291.5	3690.7	7.7043
700	0.27941	3473.5	3920.5	8.0558	0.24822	3472.6	3919.4	8.0005	0.22326	3471.7	3918.2	7.9509
800	0.30865	3659.5	4153.4	8.2834	0.27426	3658.8	4152.4	8.2284	0.24674	3658.0	4151.5	8.1791
900	0.33780	3852.1	4392.6	8.4965	0.30020	3851.5	4391.9	8.4417	0.27012	3850.9	4391.1	8.3925
1000	0.36687	4051.2	4638.2	8.6974	0.32606	4050.7	4637.6	8.6427	0.29342	4050.2	4637.1	8.5936
1100	0.39589	4256.6	4890.0	8.8878	0.35188	4256.2	4889.6	8.8331	0.31667	4255.7	4889.1	8.7842
1200	0.42488	4467.9	5147.7	9.0689	0.37766	4467.6	5147.3	9.0143	0.33989	4467.2	5147.0	8.9654
1300	0.45383	4684.8	5410.9	9.2418	0.40341	4684.5	5410.6	9.1872	0.36308	4684.2	5410.3	9.1384
	$P = 2.50 \text{ MPa (223.95 } ^\circ\text{C)}$				$P = 3.00 \text{ MPa (233.85 } ^\circ\text{C)}$				$P = 3.50 \text{ MPa (242.56 } ^\circ\text{C)}$			
Sat.	0.07995	2602.1	2801.9	6.2558	0.06667	2603.2	2803.2	6.1856	0.05706	2603.0	2802.7	6.1244
225	0.08026	2604.8	2805.5	6.2629								
250	0.08705	2663.3	2880.9	6.4107	0.07063	2644.7	2856.5	6.2893	0.05876	2624.0	2829.7	6.1764
300	0.09894	2762.2	3009.6	6.6459	0.08118	2750.8	2994.3	6.5412	0.06845	2738.8	2978.4	6.4484
350	0.10979	2852.5	3127.0	6.8424	0.09056	2844.4	3116.1	6.7450	0.07680	2836.0	3104.9	6.6601
400	0.12012	2939.8	3240.1	7.0170	0.09938	2933.6	3231.7	6.9235	0.08456	2927.2	3223.2	6.8428
450	0.13015	3026.2	3351.6	7.1768	0.10789	3021.2	3344.9	7.0856	0.09198	3016.1	3338.1	7.0074
500	0.13999	3112.8	3462.8	7.3254	0.11620	3108.6	3457.2	7.2359	0.09919	3104.5	3451.7	7.1593
600	0.15931	3288.5	3686.8	7.5979	0.13245	3285.5	3682.8	7.5103	0.11325	3282.5	3678.9	7.4357
700	0.17835	3469.3	3915.2	7.8455	0.14841	3467.0	3912.2	7.7590	0.12702	3464.7	3909.3	7.6855
800	0.19722	3656.2	4149.2	8.0744	0.16420	3654.3	4146.9	7.9885	0.14061	3652.5	4144.6	7.9156
900	0.21597	3849.4	4389.3	8.2882	0.17988	3847.9	4387.5	8.2028	0.15410	3846.4	4385.7	8.1304
1000	0.23466	4049.0	4635.6	8.4897	0.19549	4047.7	4634.2	8.4045	0.16751	4046.4	4632.7	8.3324
1100	0.25330	4254.7	4887.9	8.6804	0.21105	4253.6	4886.7	8.5955	0.18087	4252.5	4885.6	8.5236
1200	0.27190	4466.3	5146.0	8.8618	0.22658	4465.3	5145.1	8.7771	0.19420	4464.4	5144.1	8.7053
1300	0.29048	4683.4	5409.5	9.0349	0.24207	4682.6	5408.8	8.9502	0.20750	4681.8	5408.0	8.8786

Anexo C. (continuación)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
	$P = 4.0 \text{ MPa (250.35 °C)}$				$P = 4.5 \text{ MPa (257.44 °C)}$				$P = 5.0 \text{ MPa (263.94 °C)}$			
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124
	$P = 6.0 \text{ MPa (275.59 °C)}$				$P = 7.0 \text{ MPa (285.83 °C)}$				$P = 8.0 \text{ MPa (295.01 °C)}$			
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925

Anexo C. (continuación)

	<i>P</i> = 9.0 MPa (303.35 °C)				<i>P</i> = 10.0 MPa (311.00 °C)				<i>P</i> = 12.5 MPa (327.81 °C)			
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596				
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819

	<i>P</i> = 15.0 MPa (342.16 °C)				<i>P</i> = 17.5 MPa (354.67 °C)				<i>P</i> = 20.0 MPa (365.75 °C)			
Sat.	0.010341	2455.7	2610.8	5.3108	0.007932	2390.7	2529.5	5.1435	0.005862	2294.8	2412.1	4.9310
350	0.011481	2520.9	2693.1	5.4438								
400	0.015671	2740.6	2975.7	5.8819	0.012463	2684.3	2902.4	5.7211	0.009950	2617.9	2816.9	5.5526
450	0.018477	2880.8	3157.9	6.1434	0.015204	2845.4	3111.4	6.0212	0.012721	2807.3	3061.7	5.9043
500	0.020828	2998.4	3310.8	6.3480	0.017385	2972.4	3276.7	6.2424	0.014793	2945.3	3241.2	6.1446
550	0.022945	3106.2	3450.4	6.5230	0.019305	3085.8	3423.6	6.4266	0.016571	3064.7	3396.2	6.3390
600	0.024921	3209.3	3583.1	6.6796	0.021073	3192.5	3561.3	6.5890	0.018185	3175.3	3539.0	6.5075
650	0.026804	3310.1	3712.1	6.8233	0.022742	3295.8	3693.8	6.7366	0.019695	3281.4	3675.3	6.6593
700	0.028621	3409.8	3839.1	6.9573	0.024342	3397.5	3823.5	6.8735	0.021134	3385.1	3807.8	6.7991
800	0.032121	3609.3	4091.1	7.2037	0.027405	3599.7	4079.3	7.1237	0.023870	3590.1	4067.5	7.0531
900	0.035503	3811.2	4343.7	7.4288	0.030348	3803.5	4334.6	7.3511	0.026484	3795.7	4325.4	7.2829
1000	0.038808	4017.1	4599.2	7.6378	0.033215	4010.7	4592.0	7.5616	0.029020	4004.3	4584.7	7.4950
1100	0.042062	4227.7	4858.6	7.8339	0.036029	4222.3	4852.8	7.7588	0.031504	4216.9	4847.0	7.6933
1200	0.045279	4443.1	5122.3	8.0192	0.038806	4438.5	5117.6	7.9449	0.033952	4433.8	5112.9	7.8802
1300	0.048469	4663.3	5390.3	8.1952	0.041556	4659.2	5386.5	8.1215	0.036371	4655.2	5382.7	8.0574

Anexo D.

Combustible	Oxidante	(°C) T_{ad}
Metanol (CH ₄ O)	Aire	1949
Etano (C ₂ H ₆)	Aire	1955
Gas natural	Aire	1960
Metano (CH ₄)	Aire	1963
Butano (C ₄ H ₁₀)	Aire	1970
Pentano (C ₅ H ₁₂)	Aire	1977
Propano (C ₃ H ₈)	Aire	1980
Madera	Aire	1980
Gas MAPP Metilacetileno (C ₃ H ₄)	Aire	2010
Tolueno (C ₇ H ₈)	Aire	2071
Etanol (C ₂ H ₅ OH)	Aire	2082
Queroseno	Aire	2093 ⁶
Fueloil medio	Aire	2101 ⁶
Fueloil pesado	Aire	2102 ⁶
Fueloil ligero	Aire	2104 ⁶
Gasolina	Aire	2138
Hulla	Aire	2172 ⁶
Antracita	Aire	2180 ⁶

