



# POSGRADOS

## MAESTRÍA EN MÉTODOS MATEMÁTICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA EN INGENIERÍA

RPC-SO-42-NO.769-2019

OPCIÓN DE TITULACIÓN:  
PROYECTO DE DESARROLLO

TEMA:  
ESTUDIO TERMODINÁMICO MEDIANTE  
SIMULACIÓN PARA EVALUAR EL CAMBIO  
DE COMBUSTIBLE DE DIÉSEL A GAS  
NATURAL UTILIZADO EN LOS HORNOS  
DE TEMPLE DE LA FÁBRICA DE RESORTES  
VANDERBILT

AUTOR:  
FROWEN LEOVIGILDO VALENCIA LUCAS

DIRECTOR:  
FRAN ZHOVANI REINOSO AVECILLAS

CUENCA – ECUADOR  
2023



**Autor:****Frowen Leovigildo Valencia Lucas**

Ingeniero Químico.

Candidato a Magíster en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

fvalencial@est.ups.edu.ec

**Dirigido por:****Fran Zhovani Reinoso Avecillas**

Ingeniero Mecánico.

Especialista en Docencia Universitaria. Magíster en Docencia Universitaria. Máster Universitario en Investigación en Tecnologías Industriales. Doctor en Ingeniería.

freinoso@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA– ECUADOR – SUDAMÉRICA

FROWEN LEOVIGILDO VALENCIA LUCAS

Estudio termodinámico mediante simulación para evaluar el cambio de combustible de diésel a gas natural utilizado en los hornos de temple de la fábrica de resortes Vanderbilt

## **DEDICATORIA**

Me es muy grato dedicar esta tesis a toda mi familia porque ellos son el pilar que me sostiene y me inspira a continuar ante cualquier momento lleno de adversidad, pero ante todo me es de enorme alegría compartir con ustedes este nuevo triunfo.

Cada uno de ellos han entregado algo para que mi persona pueda continuar con un objetivo planteado, para mí es de infinito valor su devoción y confianza en mí para alcanzar este logro.

Sinceramente de todo corazón, muchas ... muchas gracias.

## **AGRADECIMIENTO**

A la fábrica de resortes Vanderbilt por las facilidades y apertura brindada para el desarrollo de este proyecto.

Al Ing. Bolívar Pizarro, Jefe de Manufactura e Ingeniería de la empresa mencionada, por permitirme aprender sobre el proceso de temple y brindarme una retroalimentación en la ejecución de este estudio.

Al Ing. Jorge Arpi, por tomarse el tiempo en la búsqueda de información relacionada con el objeto de este estudio y que brinda total firmeza en la culminación con éxito de este tema.

Al Ing. Fran Reinoso, Director de este trabajo de tesis, por haberme guiado y aconsejado con cada tutoría brindada con dedicación durante el trayecto y culminación de este proyecto de tesis.

A mi madre que con su amor y ternura sabe brindarme su apoyo y a mi padre que me acompaña desde el cielo y que con sus enseñanzas he sabido seguir adelante a pesar de las dificultades.

A Dios, por darme esta experiencia y la oportunidad de terminar esta etapa de mi vida con éxito.

# TABLA DE CONTENIDO

Resumen .....	15
Abstract .....	16
1. Introducción .....	17
2. Antecedentes.....	19
3. Determinación del Problema.....	21
4. Objetivos.....	23
4.1 Objetivo general.....	23
4.2 Objetivos específicos .....	23
5. Marco teórico referencial.....	24
5.1 Modelos energéticos y exergéticos en procesos térmicos.....	24
5.1.1 Conservación de la masa y energía. ....	25
5.1.2 Entropía. ....	28
5.1.3 Exergía. ....	31
5.1.3.1 Estado de referencia.....	32
5.1.3.2 Estado muerto. ....	32
5.1.3.3 Ciclo de Carnot.....	32
5.1.4 Economía de la energía. ....	38
5.2 Caracterización del proceso de temple de ballestas en la Fábrica de Resortes Vanderbilt.....	42
5.2.1 Descripción del proceso de tratamiento térmico. ....	45
5.2.1.1 Templado del acero. ....	47
5.2.1.2 Revenido. ....	51
5.2.2 Características técnicas del horno en el tratamiento térmico.....	52
5.2.3 Características de los combustibles utilizados en el proceso de temple. ....	54
6. Materiales y metodología.....	58
6.1 Balance de masa y energía del proceso de temple .....	58
6.1.1 Balance de masa y energía del combustible diésel (Caso base). ....	58
6.1.2 Balance de masa y energía del combustible Gas natural.....	68
6.2 Estudio termo económico del cambio de combustible .....	73
7. Resultados y discusión.....	77

---

8. Conclusiones.....	81
Referencias.....	83
Anexos.....	90

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1</b> <i>Esquema de procesos en la producción de ballestas en la Fábrica de Resortes Vanderbilt</i> .....	43
<b>Figura 2</b> <i>Diagrama de clasificación general de los procesos de tratamientos térmicos</i>	46
<b>Figura 3</b> <i>Horno de temple de la Fábrica de Resortes Vanderbilt</i> .....	47
<b>Figura 4</b> <i>Cuba de enfriamiento por inmersión en aceite de la Fábrica de Resortes Vanderbilt</i> .....	50
<b>Figura 5</b> <i>Curva temperatura de revenido vs dureza para diferentes aceros</i> .....	52
<b>Figura 6</b> <i>Esquema del balance de masa en el horno de temple</i> .....	58
<b>Figura 7</b> <i>Esquema del balance de energía en el horno de temple</i> .....	60
<b>Figura 8</b> <i>Diagrama de flujo de algoritmo de cálculo de temperatura y entalpía</i> .....	63
<b>Figura 9</b> <i>Esquema del balance de entropía en el horno de temple</i> .....	65

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Normas técnicas aplicadas al uso de aceros de construcción .....	42
<b>Tabla 2</b> Composición química del acero tratado .....	49
<b>Tabla 3</b> Composición química del combustible.....	55
<b>Tabla 4</b> Propiedades físico químicas del combustible .....	55
<b>Tabla 5</b> Propiedades físico químicas del gas natural.....	57
<b>Tabla 6</b> Valores calculados de entalpía de sustancias reactantes y productos a la temperatura $T_i=2679\text{ K}$ .....	64
<b>Tabla 7</b> Valores calculados de flujo molar, fracción molar y entropía específica de sustancias reactantes y productos a determinada temperatura .....	67
<b>Tabla 8</b> Valores calculados de entalpías en la reacción del gas natural .....	70
<b>Tabla 9</b> Valores calculados de flujo molar, fracción molar y entropía absoluta en la reacción del gas natural .....	71
<b>Tabla 10</b> Balance molar Diésel vs Gas natural .....	77
<b>Tabla 11</b> Balance energético Diésel vs Gas natural.....	78
<b>Tabla 12</b> Balance de entropía Diésel vs Gas natural .....	78
<b>Tabla 13</b> Balance de exergía destruida Diésel vs Gas natural.....	79
<b>Tabla 14</b> Balance termo económico Diésel vs Gas natural.....	80



# NOMENCLATURA

$A$	Área [m <sup>2</sup> ]
$A_a$	Área plana media irradiada de ladrillo aislante [m <sup>2</sup> ]
$A_n$	Anualidad [dlmn]
$A_r$	Área plana media irradiada de ladrillo refractario [m <sup>2</sup> ]
$A_s$	Área superficial [m <sup>2</sup> ]
$c$	Costo exergo económico unitario [USD/J]
$c_F$	Costo exergo económico unitario de combustible [USD/J]
$C_{CH_4}$	Costo de combustible metano por unidad de masa [USD/kg]
$C_F$	Costo de combustible diésel por unidad de masa [USD/kg]
$\dot{C}_d$	Tasa de costo de destrucción de exergía [USD/h]
$\dot{C}_e$	Costo exergo económico de flujo de entrada [USD/h]
$\dot{C}_Q$	Costo exergo económico de calor [USD/h]
$\dot{C}_s$	Costo exergo económico de flujo de salida [USD/h]
$\dot{C}_W$	Costo exergo económico de trabajo [USD/h]
$CELF$	Factor de nivelación de escalada constante [dlmn]
$CRF$	Factor de recuperación de capital [dlmn]
$\Delta m$	Cambio en la cantidad de masa durante un periodo de tiempo [kg]
$\Delta S_{Frontera}$	Entropía de los alrededores al sistema [J/K]
$\Delta S_{Sistema}$	Entropía del sistema [J/K]
$\Delta S_{Total}$	Entropía total o del universo [J/K]
$e_x$	Exergía específica [J/kg]
$e_{x\ entrada}$	Exergía específica transferida hacia el sistema [J/kg]
$e_{x\ salida}$	Exergía específica transferida desde el sistema [J/kg]
$E$	Energía [J]
$E_c$	Energía cinética [J]
$E_p$	Energía potencial [J]
$E_x$	Exergía [J]
$E_{x/F}$	Exergía destruida por unidad de masa de combustible diésel [kJ/kg]
$E_{x/CH_4}$	Exergía destruida por unidad de masa de combustible metano [kJ/kg]
$\dot{E}_{entrada}$	Flujo de energía transferida hacia el sistema [J/h]
$\dot{E}_{salida}$	Flujo de energía transferida desde el sistema [J/h]
$\dot{E}_x$	Flujo de exergía [J/h]
$\dot{E}_{x\ destruida}$	Flujo de exergía destruida [J/h]
$\dot{E}_{x\ entrada}$	Flujo de exergía transferida hacia el sistema [J/h]
$\dot{E}_{x\ m, entrada}$	Flujo de exergía transferida hacia el sistema debido a la masa [J/h]
$\dot{E}_{x\ m, salida}$	Flujo de exergía transferida desde el sistema debido a la masa [J/h]
$\dot{E}_{xQ, entrada}$	Flujo de exergía transferida hacia el sistema debido al calor [J/h]
$\dot{E}_{x\ salida}$	Flujo de exergía transferida desde el sistema [J/h]
$\dot{E}_{xW, salida}$	Flujo de exergía transferida desde el sistema debido al trabajo [J/h]

$\varepsilon$	Emisividad [dlmn]
$f_{OM}$	Factor exergo económico por operación y mantenimiento [dlmn]
$f_k$	Factor exergo económico [dlmn]
$g$	Valor de la gravedad [ $m/h^2$ ]
$h_0$	Entalpía específica en el estado muerto [J/kg]
$h_{entrada}$	Entalpía específica transferida hacia el sistema [J/kg]
$h_{salida}$	Entalpía específica transferida desde el sistema [J/kg]
$\bar{h}$	Entalpía molar a determinada temperatura [kJ/kmol]
$\bar{h}^0$	Entalpía molar a la temperatura de referencia [kJ/kmol]
$\bar{h}_f^0$	Entalpía molar de formación [kJ/kmol]
$\bar{h}_{T,CO_2}$	Entalpía molar del dióxido de carbono a la temperatura T [kJ/kmol]
$\bar{h}_{T,H_2O}$	Entalpía molar del vapor de agua a la temperatura T [kJ/kmol]
$\bar{h}_{T,N_2}$	Entalpía molar del nitrógeno a la temperatura T [kJ/kmol]
$\bar{h}_{T,O_2}$	Entalpía molar del oxígeno a la temperatura T [kJ/kmol]
$\bar{h}_{T,SO_2}$	Entalpía molar del dióxido de azufre a la temperatura T [kJ/kmol]
$\eta_C$	Rendimiento máximo en el Ciclo de Carnot [dlmn]
$i$	Tasa de descuento efectiva [dlmn]
$i_n$	Factor de escalamiento nominal [dlmn]
$k$	Conductividad térmica [J/m-h-K]
$k_a$	Conductividad térmica del ladrillo aislante [J/m-h-K]
$k_r$	Conductividad térmica del ladrillo refractario [J/m-h-K]
$K$	Constante de escalada [dlmn]
$m$	Masa [kg]
$m_{destruida}$	Cantidad de masa destruida dentro del sistema [kg]
$m_{entrada}$	Cantidad de masa que entra al sistema [kg]
$m_{generada}$	Cantidad de masa generada dentro del sistema [kg]
$m_{salida}$	Cantidad de masa que sale del sistema [kg]
$\dot{m}_{acero}$	Flujo másico de acero [kg/h]
$\dot{m}_{aire}$	Flujo másico de aire [kg/h]
$\dot{m}_{diésel}$	Flujo másico de combustible diésel [kg/h]
$\dot{m}_{entrada}$	Flujo másico a la entrada del sistema [kg/h]
$\dot{m}_{gases}$	Flujo másico de gases [kg/h]
$\dot{m}_{salida}$	Flujo másico a la salida del sistema [kg/h]
$\dot{m}_{CH_4}$	Flujo másico de combustible metano [kg/h]
$\dot{n}_{aire}$	Flujo molar de aire [kmol/h]
$\dot{n}_{diésel}$	Flujo molar de combustible diésel [kmol/h]
$\dot{n}_{gases}$	Flujo molar de gases [kmol/h]
$\dot{n}_p$	Flujo molar de los productos de una reacción química [kmol/h]
$\dot{n}_r$	Flujo molar de los reactantes de una reacción química [kmol/h]
$\dot{n}_{CH_4}$	Flujo molar de combustible metano [kmol/h]
$\dot{n}_{CO_2}$	Flujo molar de dióxido de carbono [kmol/h]
$\dot{n}_{H_2O}$	Flujo molar de vapor de agua [kmol/h]
$\dot{n}_{N_2}$	Flujo molar de nitrógeno [kmol/h]
$\dot{n}_{O_2}$	Flujo molar de oxígeno [kmol/h]
$P$	Presión del proceso de reacción química [ $N/m^2$ ]
$P_0$	Presión en el estado muerto [ $N/m^2$ ]

$P_c$	Poder calorífico [kcal/kg]
$P_{ref}$	Presión de referencia [N/m <sup>2</sup> ]
$PEC_k$	Costo de compra del equipo del componente k [USD]
$Q$	Calor transferido [J]
$Q_1$	Calor transferido en expansión isotérmica [J]
$Q_2$	Calor transferido en expansión adiabática [J]
$Q_3$	Calor transferido en compresión isotérmica [J]
$Q_4$	Calor transferido en compresión adiabática [J]
$\dot{Q}_{acero}$	Flujo de calor absorbido por el acero [kJ/h]
$\dot{Q}_{diésel}$	Flujo de calor transferido por el combustible diésel [kJ/h]
$\dot{Q}_{entrada}$	Flujo de calor que entra al sistema [J/h]
$\dot{Q}_{gases}$	Flujo de calor debido a los gases [kJ/h]
$\dot{Q}_{pérdidas}$	Flujo de calor por pérdidas [kJ/h]
$\dot{Q}_{r \rightarrow p CH_4}$	Flujo de calor de la reacción química del metano [kJ/h]
$\dot{Q}_{salida}$	Flujo de calor que sale del sistema [J/h]
$\bar{R}$	Constante molar de los gases [J/kmol-K]
$s_0$	Entropía específica en el estado muerto [J/kg-K]
$s_{entrada}$	Entropía específica transferida hacia el sistema [J/kg-K]
$s_{salida}$	Entropía específica transferida desde el sistema [J/kg-K]
$\bar{s}^0$	Entropía molar específica [kJ/kmol-K]
$S$	Entropía [J/K]
$S_A$	Entropía transferida al inicio de la expansión isotérmica [J/K]
$S_B$	Entropía transferida al final de la expansión isotérmica [J/K]
$S_C$	Entropía transferida al inicio de la compresión isotérmica [J/K]
$S_D$	Entropía transferida al final de la compresión isotérmica [J/K]
$\dot{S}_{acero,in}$	Flujo de entropía transferida hacia el sistema debido al acero [kJ/h-K]
$\dot{S}_{acero,out}$	Flujo de entropía transferida desde el sistema debido al acero [kJ/h-K]
$\dot{S}_{diésel}$	Flujo de entropía debido al combustible [kJ/h-K]
$\dot{S}_{entrada}$	Flujo de entropía transferida hacia el sistema [J/h-K]
$\dot{S}_{gases}$	Flujo de entropía debido a los gases [kJ/h-K]
$\dot{S}_{generada}$	Flujo de entropía generada dentro del sistema [J/h-K]
$\dot{S}_{m,entrada}$	Flujo de entropía transferida hacia el sistema debido a la masa [J/h-K]
$\dot{S}_{m,salida}$	Flujo de entropía transferida desde el sistema debido a la masa [J/h-K]
$\dot{S}_{pérdidas}$	Flujo de entropía por pérdidas [kJ/h-K]
$\dot{S}_{salida}$	Flujo de entropía transferida desde el sistema [J/h-K]
$\dot{S}_{CH_4}$	Flujo de entropía debido al metano [kJ/h-K]
$\dot{S}_{Q,entrada}$	Flujo de entropía transferida hacia el sistema debido al calor [J/h-K]
$\dot{S}_{Q,salida}$	Flujo de entropía transferida desde el sistema debido al calor [J/h-K]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann [kJ/h-m <sup>2</sup> -K <sup>4</sup> ]
$t$	Tiempo [h]
$t_s$	Vida económica del sistema [años]
$T$	Temperatura [K]
$T_0$	Temperatura en el estado muerto [K]
$T_1$	Temperatura caliente en el Ciclo de Carnot [K]
$T_2$	Temperatura fría en el Ciclo de Carnot [K]

$T_{acero}$	Temperatura final del acero [K]
$T_{b,entrada}$	Temperatura de la frontera cuando el calor ingresa [K]
$T_{b,salida}$	Temperatura de la frontera cuando el calor sale [K]
$T_i$	Temperatura interna del horno [K]
$T_p$	Temperatura de la pared del horno [K]
$TCI$	Capital total de inversión [USD]
$\tau$	Tiempo operativo anual del sistema [h]
$U$	Energía interna [J]
$v_{entrada}$	Velocidad de entrada hacia el sistema [m/h]
$v_{salida}$	Velocidad de salida desde el sistema [m/h]
$V$	Volumen [m <sup>3</sup> ]
$V_p$	Valor presente [dlmn]
$W_{max}$	Trabajo máximo realizable en un sistema [J]
$W_C$	Trabajo realizado en el Ciclo de Carnot [J]
$\dot{W}_{entrada}$	Flujo de trabajo que entra al sistema [J/h]
$\dot{W}_{frontera}$	Flujo de trabajo en los alrededores [J/h]
$\dot{W}_{salida}$	Flujo de trabajo que sale del sistema [J/h]
$\varphi$	Factor de mantenimiento [dlmn]
$x$	Espesor de pared [m]
$x_a$	Espesor de pared de ladrillo aislante [m]
$x_r$	Espesor de pared de ladrillo refractario [m]
$y$	Fracción molar [dlmn]
$z_{entrada}$	Elevación a la entrada del sistema [m]
$z_{salida}$	Elevación a la salida del sistema [m]
$\dot{Z}$	Suma de costos de inversión de capital y de operación y mantenimiento [USD/h]
$\dot{Z}^{CI}$	Costo de inversión de capital [USD/h]
$\dot{Z}^M$	Tasa de costo de mantenimiento [USD/h]
$\dot{Z}^O$	Tasa de costo de operación [USD/h]
$\dot{Z}^{OM}$	Tasa de costo de operación y mantenimiento [USD/h]

ESTUDIO  
TERMODINÁMICO  
MEDIANTE  
SIMULACIÓN PARA  
EVALUAR EL CAMBIO  
DE COMBUSTIBLE DE  
DIÉSEL A GAS NATURAL  
UTILIZADO EN LOS  
HORNOS DE TEMPLE  
DE LA FÁBRICA DE  
RESORTES VANDERBILT

---

AUTOR(ES):

FROWEN LEOVIGILDO VALENCIA LUCAS

## RESUMEN

---

El presente proyecto de investigación tiene como propósito evaluar mediante simulación las condiciones termo económicas del diésel a gas natural utilizado en los hornos de temple de la fábrica de resortes Vanderbilt. Para el efecto se realiza una revisión bibliográfica de los modelos energéticos y exergéticos de los procesos térmicos, a continuación se caracteriza el proceso de temple de ballestas, se realiza los balances de masa, energía y exergía del proceso de temple utilizando diésel y gas natural. Finalmente, se realiza el estudio termo económico del cambio de combustible. Los resultados de las simulaciones muestran que es conveniente realizar el cambio de combustible de diésel a gas natural en los hornos de temple de la fábrica de resortes Vanderbilt debido a que la exergía destruida es 37 veces mayor utilizando gas natural en comparación al diésel.

**Palabras clave:**

Estudio termodinámico, Resortes, Cambio de combustible, Horno de temple.

## ABSTRACT

---

The present research project has as a purpose to evaluate through simulation the thermo economic conditions of the change of fuel from diesel to natural gas used in the tempering furnace of the Vanderbilt spring factory. For this effect, it is done a bibliographic review of the energetic and exergetic models of the thermal processes, then it is characterized the spring tempering process, it is done the mass, energy, and exergy balance of the tempering process using diesel and natural gas. Finally, it is realized the thermoeconomic study of the fuel change. The results of the simulations show that it is convenient working in the fuel change from diesel to natural gas in the tempering furnace of the Vanderbilt spring factory due to the destroyed exergy is thirty seven times greater using natural gas compared with diesel.

**Palabras clave:**

Thermodynamic study, Springs, Fuel change, Tempering furnace.



# 1. INTRODUCCIÓN

La investigación se enmarca en el ámbito del análisis termodinámico del proceso de temple que se desarrolla en la fábrica de resortes Vanderbilt para la manufactura de ballestas usados en la industria automotriz. En este proyecto se presenta un enfoque cuantitativo a la problemática de la termo economía del combustible, apoyado por procedimientos de cálculo necesarios y validados por programas computacionales especializados de ingeniería. La importancia del tema radica en la adopción de nueva tecnología por parte de la empresa tomada como caso de estudio, principalmente en el proceso de temple, en la cual se establece la necesidad del cambio de combustible como una oportunidad de gestión de mejora, que requiere una argumentación técnica, misma que es abordada en el desarrollo de este trabajo.

La investigación de esta problemática se realiza por el interés de determinar las ventajas del uso de gas natural como combustible alternativo en el proceso de temple de la fábrica de resortes Vanderbilt. Adicional a ello, es persuasivo e imperante la aplicación de conocimientos técnicos y científicos en el desarrollo industrial que al final del día resulta en el bienestar de toda la población. Por último, es menester mencionar que hay un interés implícito que se espera tenga origen en el transcurso de esta investigación debido a que se pueden descubrir nuevos problemas que deben ser atacados por personal técnico o científico y que dejan una nueva puerta abierta para futuras investigaciones.

Como metodología empleada se resalta el uso de información brindada por la empresa y la utilización de elementos bibliográficos para la aplicación de balances termodinámicos en el proceso de temple; y así, determinar las variables a utilizar para el análisis respectivo. En el marco del balance de energía y exergía del proceso de temple de ballestas, se realiza la simulación utilizando diésel y gas natural para evaluar la eficacia del proceso con cada combustible mediante la comparación de la exergía destruida por dichos procesos. Cabe indicar que el proceso de temple en

el uso de combustibles implica las reacciones químicas, por lo que en dicho análisis son prioritarias algunas variables como la entalpía y la entropía.

El objetivo de la investigación es realizar un estudio termodinámico para evaluar el cambio de combustible de diésel a gas natural utilizado en los hornos de temple de la fábrica de resortes Vanderbilt. Con esta evaluación, la fábrica mencionada puede tomar una decisión sobre el cambio de combustible basados en criterios termodinámicos y con unas ciertas variables económicas insertadas en el texto que permiten apreciar de forma general dicho cambio. Por otra parte, una finalidad perseguida es la solución de forma ingeniosa de un problema real con criterios científicos aprendidos en la formación académica.

El documento de este trabajo está estructurado en nueve apartados. En los apartados del uno al cuatro se aborda la problemática general. En el apartado cinco se revisan los modelos energéticos y exergéticos, la caracterización del proceso de temple se plantea en el mismo apartado, los diferentes balances realizados tanto con el combustible usado como por el combustible propuesto junto con un estudio termo económico se presenta en el apartado seis, el análisis de los resultados en el apartado siete, las conclusiones se presentan en el apartado ocho y por último se puede observar algunos anexos requeridos en la ejecución de este trabajo.

## 2. ANTECEDENTES

La mitigación de los problemas medioambientales a partir de las últimas décadas ha sido de vital importancia para el mantenimiento de recursos medioambientales y la salud de la población. En contraste, la revolución industrial ha permitido que la humanidad alcance un gran desarrollo económico y de adquisición de productos y servicios. Por ende, actualmente la población goza de una relativa conformidad en relación a los productos necesarios y que ofrecen muchas empresas a nivel global (Suárez Tamayo & Molina Esquivel, 2014).

Todo lo anteriormente mencionado sugiere disponer de una logística para cambiar el sistema energético con el cual se alimentan las máquinas que producen los productos que adquiere el consumidor final. Cabe incluir que en la actualidad hay una revolución tecnológica que también necesita del consumo energético para la producción de elementos necesarios para la fabricación de partes y equipos que permiten una mejor atención a las necesidades tecnológicas de los diferentes estratos, profesionales, empresarios, educadores, etc (Shrouf et al., 2014).

Ante lo expuesto, el productor se ve en la necesidad de seguir ofreciendo al mercado sus productos y servicios, pero de una forma totalmente amigable con el medio ambiente y cuidando de la salud de sus consumidores, como lo establecen las diferentes filosofías como la química verde, la producción limpia, la industria 5.0 entre otras. Todas éstas persiguen una meta en común, el cuidado al medio ambiente y a la población (Villa, 2022).

En este mismo sentido, la fábrica de resortes Vanderbilt ubicada en la ciudad de Cuenca de la provincia del Azuay – Ecuador también aporta en el objetivo de tener una producción alineada a las filosofías anteriormente mencionadas, por lo que han implementado políticas que propendan a la mejora continua de sus procesos, dentro de las cuales se ha considerado la matriz energética. Para ello, es necesario los análisis técnicos que evalúen el uso de energías alternativas que produzcan una

permisible eficiencia energética en los procesos de manufactura de los bienes y productos (Garrido et al., 2012).

Aunque la fábrica de resortes Vanderbilt tiene una gran variedad de productos, el mayor consumo energético proviene de la zona de tratamientos térmicos. Debido a esto, una ciencia que permite esta evaluación es la termodinámica y que valiéndose de las propiedades de la materia permite obtener conclusiones muy válidas en el ámbito ingenieril y empresarial (López-Mata et al., 2016). Por lo tanto, la fábrica de resortes Vanderbilt en su afán de obtener una mejora ha permitido que se realice un estudio de tipo termodinámico.

Como referencia se establece los principios de la termodinámica que serán definidos en capítulos posteriores y que bajo el interés investigativo de este tema serán de gran utilidad en la obtención de resultados que midan la situación energético actual de la empresa y la probable con un recurso energético diferente. Cabe indicar que, debido al proceso en la fábrica de resortes, es intrínseco que se aplique conocimientos de otra disciplina tal como la química. Es así, que en este ensayo se plantean los modelos necesarios para el análisis mencionado y se caracteriza el proceso de temple para obtener una correcta base de estudio termodinámico.

### 3. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

Según la Cámara de la Industria Automotriz Ecuatoriana CINAE, el ensamblaje de automóviles de origen nacional tiene una participación del 12% del mercado nacional. Además, la CINAE indica que las principales marcas que ensamblan sus vehículos en territorio ecuatoriano para la venta al consumidor final son: General Motors, Ciauto, Kia, Volkswagen, Hyundai y JAC. Todas las marcas mencionadas poseen modelos de automóviles que deben tener un contenido del 19% con autopartes ecuatorianas para el ensamblaje de dichos vehículos (CINAE, 2022).

Por otra parte, la Federación Ecuatoriana de Exportadores FEDEXPOR otorgó el premio a primer lugar a la fábrica de resortes Vanderbilt debido al crecimiento sostenible en exportaciones de los productos por parte de la empresa mencionada derivados a países como Perú, Colombia y República Dominicana. Cabe adicionar que, entre los cambios iniciados por la empresa mencionada está la alineación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS para medidas de acción frente a una problemática de impacto ambiental (Vanderbilt, 2022).

Como se puede observar, la fábrica de resortes Vanderbilt posee una imagen de excelencia y de alta calidad tanto a nivel nacional como internacional. Por lo que en la iniciativa de la fábrica de resortes Vanderbilt de plantearse nuevos horizontes con una visión de interés medioambiental sin menoscabar la calidad de manufactura en su producto, en este caso propone realizar cambios en el proceso de templado del acero en la producción de resortes, la cual ha sido utilizado por muchos años y aunque ha dado excelentes resultados puede alcanzar un nuevo nivel de excelencia (Vanderbilt, 2022).

El templado del acero en la fábrica de resortes Vanderbilt se realiza en un horno que utiliza diésel como combustible. En consecuencia, y con una filosofía de producción más limpia, la fábrica de resortes Vanderbilt se proyecta el objetivo de cambiar el combustible usado, y así obtener un mejor porvenir para las futuras

generaciones. Con esta visión, es necesario conocer las características del proceso y entender el rendimiento con dicho combustible (Jiménez & Salazar, 2016).

Sin lugar a dudas, el consumo de combustibles fósiles produce gases de efecto invernadero por lo que el objetivo principal es disminuir la cantidad de emisiones y en mejor caso su reducción total. La fábrica de resortes Vanderbilt también persigue esta meta y aunque se debe tomar en cuenta muchos factores, opta por empezar a consumir gas natural como combustible para el horno de templado de las piezas manufacturadas (Jiménez & Salazar, 2016).

Ante lo expuesto, se desea conocer el alcance de la nueva propuesta de energía calorífica por lo que se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible realizar un estudio termodinámico mediante simulación para determinar la factibilidad del cambio de combustible utilizado en el horno de temple de la sección de tratamientos térmicos de la Fábrica de Resortes Vanderbilt? La respuesta a esta interrogante se persigue en el desarrollo de este tema de tesis.

## 4. OBJETIVOS

---

### 4.1 *OBJETIVO GENERAL*

Realizar un estudio termodinámico mediante simulación para evaluar el cambio de combustible de diésel a gas natural utilizado en los hornos de temple de la Fábrica de Resortes Vanderbilt.

### 4.2 *OBJETIVOS ESPECÍFICOS*

- i. Estudiar los modelos energéticos y exergéticos de un proceso térmico.
- ii. Determinar la situación energética actual del proceso de temple de la Fábrica de Resortes Vanderbilt.
- iii. Simular el proceso térmico en el horno de temple bajo condiciones de operación a Diésel y Gas natural.
- iv. Realizar el cálculo termo económico del cambio de tipo de combustible diésel a gas natural en el horno de Temple de la Fábrica de Resortes Vanderbilt.

## 5. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

En este apartado se establece los modelos matemáticos de índole termodinámica que se utiliza en la fabricación de resortes. También, se hace referencia a los modelos económicos ligados a las variables termodinámicas correspondientes. Además, se caracteriza los procesos presentes en la fábrica de resortes Vanderbilt respecto de los procesos térmicos que definen el objeto de este estudio, es decir, el proceso de temple y el combustible usado frente al propuesto.

### *5.1 MODELOS ENERGÉTICOS Y EXERGÉTICOS EN PROCESOS TÉRMICOS*

Un proceso térmico es aquel proceso que involucra un gradiente de temperatura de un sistema termodinámico, normalmente mediante un intercambio de calor con los alrededores del sistema. Este gradiente de temperatura implica la entrega de energía por parte de un cuerpo con una alta temperatura, la velocidad de las moléculas es elevada, hacia un cuerpo de baja temperatura donde la velocidad de sus moléculas es menor. El punto final de este proceso es alcanzar un estado de equilibrio en donde las velocidades de las moléculas de ambos cuerpos llegan a ser iguales, es decir, igual temperatura (Marrugo Carreazo et al., 2015).

Bajo la definición anterior y sin perder generalidad, es conveniente tratar las características de un sistema térmico para el estudio del tema a tratar en este proyecto. En el tratamiento de este tema hay que considerar que las características del sistema están compuestas por un “medio continuo” de tal forma que el comportamiento del medio puede predecirse mediante un modelo matemático con características determinadas y condiciones de estricto cumplimiento (Lozada et al., 2018).

Las características de un sistema térmico están relacionadas con algunas propiedades extensivas tal como la masa, la energía, la entropía y la exergía que



sufren transformaciones en dicho sistema (Blanco et al., 2020). El modelado matemático debe incluir las propiedades mencionadas por lo que a continuación se describen ecuaciones que rigen su comportamiento según los siguientes criterios:

- Conservación de masa y energía.
- Entropía.
- Exergía.
- Economía de la energía.

### *5.1.1 CONSERVACIÓN DE LA MASA Y ENERGÍA.*

La masa y la energía como magnitudes físicas en un medio continuo son conservadas en el tiempo, de esto resulta las leyes denominadas de conservación de la masa y energía (Escabedo & Bocanegra, 2016). Siguiendo la metodología usada por los autores Klein & Nellis (2011) y Doran (2012), para la deducción de la conservación de la masa es necesario aplicar la ecuación general de balance, la cual indica que, al analizar una propiedad en un sistema, la suma de la cantidad de dicha propiedad a la entrada junto con lo generado es igual a la suma de la cantidad presente a la salida junto con lo destruido y la acumulación que se pudiere suscitar por determinado periodo.

En el caso de la masa, la ecuación general de balance toma la forma de:

$$m_{entrada} + m_{generada} = m_{salida} + m_{destruida} + \Delta m \quad (1)$$

donde,

$m_{entrada}$	Cantidad de masa que entra al sistema al cruzar la frontera [kg].
$m_{generada}$	Cantidad de masa generada dentro del sistema [kg].
$m_{salida}$	Cantidad de masa que sale del sistema a través de la frontera [kg].
$m_{destruida}$	Cantidad de masa que se destruye dentro del sistema [kg].

$\Delta m$  Cambio en la cantidad de masa durante un periodo de tiempo [kg].

Debido a que el caso de estudio no se relaciona con reacciones nucleares, la cantidad de masa no puede ser generada ni destruida (Villamar et al., 2012), por lo que la ecuación anterior toma la forma de:

$$m_{entrada} = m_{salida} + \Delta m \quad (2)$$

En su forma diferencial, el balance de masa está dado por:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{salida} \quad (3)$$

donde,

$\frac{dm}{dt}$  Tasa de cambio de la masa en el sistema [kg/h].

$\dot{m}_{entrada}$  Flujo másico a la entrada del sistema a través de la frontera [kg/h].

$\dot{m}_{salida}$  Flujo másico a la salida del sistema a través de la frontera [kg/h].

Al igual que para la deducción de la conservación de la masa, es necesario aplicar la ecuación general de balance para la energía. Sin embargo, se debe acudir a la Primera ley de la termodinámica que indica que la energía no se genera ni se destruye, solo sufre transformación, siempre y cuando haya ausencia de reacciones nucleares (Bravo Gaete et al., 2019). Por lo tanto, la expresión matemática a obtener sigue un procedimiento similar para la masa, y se reduce a la siguiente forma:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} \quad (4)$$

donde,

$\frac{dE}{dt}$  Tasa de cambio de energía contenida en el sistema [J/h].

$\dot{E}_{entrada}$  Flujo de energía transferida hacia el sistema a través de la frontera [J/h].

$\dot{E}_{salida}$  Flujo de energía transferida fuera del sistema a través de la frontera [J/h].

La energía puede ser transferida a través de las fronteras en forma de calor y trabajo, por lo que:

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{Q}_{entrada} + \dot{W}_{entrada} \quad (5)$$

$$\dot{E}_{salida} = \dot{Q}_{salida} + \dot{W}_{salida} \quad (6)$$

donde,

$\dot{Q}_{entrada}$  Flujo de calor que entra al sistema a través de la frontera [J/h].

$\dot{Q}_{salida}$  Flujo de calor que sale del sistema a través de la frontera [J/h].

$\dot{W}_{entrada}$  Flujo de trabajo que entra al sistema a través de la frontera [J/h].

$\dot{W}_{salida}$  Flujo de trabajo que sale del sistema a través de la frontera [J/h].

Por otra parte, la energía que se puede almacenar en el sistema se expresa como energía cinética, energía potencial y energía interna, es decir:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt} + \frac{dU}{dt} \quad (7)$$

donde,

$\frac{dE_c}{dt}$  Tasa de energía cinética dentro del sistema [J/h].

$\frac{dE_p}{dt}$  Tasa de energía potencial dentro del sistema [J/h].

$\frac{dU}{dt}$  Tasa de energía interna dentro del sistema [J/h].

Reemplazando las tres últimas igualdades obtenidas en la ecuación de balance, se llega a:

$$\frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt} + \frac{dU}{dt} = \dot{Q}_{entrada} - \dot{Q}_{salida} + \dot{W}_{entrada} - \dot{W}_{salida} \quad (8)$$

### 5.1.2 ENTROPÍA.

Rudolf Clausius en 1865, propuso una nueva propiedad denominada entropía de tal forma que todos los estados de la materia en un mismo valor de entropía pueden ser situados mediante un proceso adiabático reversible (Michaud, 2016). Sin embargo, en palabras más contemporáneas la entropía es definida como la relación de una cantidad diferencial de calor transferido en un sistema con un proceso reversible a la temperatura en el que el calor es transferido. Una forma habitual de entender a la entropía es como la parte de energía calorífica que no puede ser utilizada para realizar un trabajo en un proceso reversible (Michaud, 2021).

Utilizando lo expuesto, a continuación se detalla la obtención del balance entrópico. En términos matemáticos, la entropía es:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \Big|_{rev} \quad (9)$$

donde,

$dS$  Entropía física [J/K].

$\delta Q$  Cantidad de calor absorbida en el proceso [J].

$T$  Temperatura absoluta [K].

Cabe mencionar que el calor no es una función de estado por lo que se utiliza  $\delta Q$  en vez de  $dQ$ . Como se puede intuir, el valor de la entropía depende de la estructura interna de la materia que compone el sistema. Por lo tanto, se deduce que hay una interacción entre la entropía del sistema y los alrededores denominada entropía total (Salas-Banuet et al., 2015).

$$\Delta S_{Total} = \Delta S_{Sistema} + \Delta S_{Frontera} \geq 0 \quad (10)$$

Cuando se trata de un proceso reversible, la entropía total es cero puesto que el calor del sistema es igual al trabajo realizado. Esta última ecuación conduce a la Segunda ley de la termodinámica, expuesta por Clausius en 1850, que dice: “El calor no puede pasar espontáneamente desde un cuerpo de baja temperatura a un cuerpo de alta temperatura” (Trigo, 2019).

En este punto se entiende que la entropía no es una cantidad conservativa como la masa y la energía. De esta forma al aplicar la ecuación general de balance el término de generación no es nulo como resultado de los procesos irreversibles. Por lo tanto, la ecuación de balance de entropía resulta:

$$\frac{dS}{dt} = \dot{S}_{entrada} + \dot{S}_{generada} - \dot{S}_{salida} \quad (11)$$

donde,

$\frac{dS}{dt}$  Tasa de cambio en la entropía del sistema [J/h-K].

$\dot{S}_{entrada}$  Flujo de entropía transferida hacia el sistema a través de la frontera [J/h-K].

$\dot{S}_{generada}$  Velocidad de entropía generada en el sistema debido a procesos internos [J/h-K].

$\dot{S}_{salida}$  Flujo de entropía transferida fuera del sistema a través de la frontera [J/h-K].

El flujo de entropía de entrada o de salida a través de la frontera se puede dar de dos formas: mediante transferencia de masa o transferencia de calor. Por lo tanto, se tiene que:

$$\dot{S}_{entrada} = \dot{S}_{m,entrada} + \dot{S}_{Q,entrada} \quad (12)$$

$$\dot{S}_{salida} = \dot{S}_{m,salida} + \dot{S}_{Q,salida} \quad (13)$$

donde,

$\dot{S}_{m,entrada}$  Flujo de entropía por transferencia de masa hacia el sistema a través de la frontera [J/h-K].

$\dot{S}_{m,salida}$  Flujo de entropía por transferencia de masa desde el sistema a través de la frontera [J/h-K].

$\dot{S}_{Q,entrada}$  Flujo de entropía por transferencia de calor hacia el sistema a través de la frontera [J/h-K].

$\dot{S}_{Q,salida}$  Flujo de entropía por transferencia de calor hacia el sistema a través de la frontera [J/h-K].

Cabe mencionar que, aunque el trabajo está presente en la transferencia de energía, no existe entropía asociada con el trabajo.

Debido a que la entropía es una propiedad de la masa, se puede considerar la entropía ( $S$ ) como el producto de la masa ( $m$ ) por la entropía específica ( $s$ ), es decir:  $S=m*s$ . De esta forma, el flujo de entropía que entra al sistema y sale del sistema por transferencia de masa, respectivamente, es:

$$\dot{S}_{m,entrada} = \dot{m}_{entrada} s_{entrada} \quad (14)$$

$$\dot{S}_{m,salida} = \dot{m}_{salida} s_{salida} \quad (15)$$

donde,

$s_{entrada}$  Entropía específica hacia el sistema a través de la frontera [J/kg-K].

$s_{salida}$  Entropía específica desde el sistema a través de la frontera [J/kg-K].

De acuerdo con la definición inicial, el flujo de entropía hacia y desde el sistema de forma respectiva, es el calor transferido, entrada o salida, a la temperatura respectiva de la frontera, es decir:

$$\dot{S}_{Q,entrada} = \frac{\dot{Q}_{entrada}}{T_{b,entrada}} \quad (16)$$

$$\dot{S}_{Q,salida} = \frac{\dot{Q}_{salida}}{T_{b,salida}} \quad (17)$$

donde,

$T_{b,entrada}$  Temperatura absoluta en la frontera donde el calor es transferido hacia el sistema [K].

$T_{b,salida}$  Temperatura absoluta en la frontera donde el calor es transferido desde el sistema [K].

Finalmente reemplazando las últimas ecuaciones, se obtiene el balance entrópico en un sistema que está dado por:

$$\frac{dS}{dt} = \dot{S}_{m,entrada} + \dot{S}_{Q,entrada} + \dot{S}_{generada} - \dot{S}_{m,salida} - \dot{S}_{Q,salida} \quad (18)$$

$$\frac{dS}{dt} = \dot{m}_{entrada}S_{entrada} + \frac{\dot{Q}_{entrada}}{T_{b,entrada}} + \dot{S}_{generada} - \dot{m}_{salida}S_{salida} - \frac{\dot{Q}_{salida}}{T_{b,salida}} \quad (19)$$

Reordenando los términos, se obtiene la expresión conocida:

$$\frac{dS}{dt} = \dot{S}_{generada} + \dot{m}_{entrada}S_{entrada} - \dot{m}_{salida}S_{salida} + \frac{\dot{Q}_{entrada}}{T_{b,entrada}} - \frac{\dot{Q}_{salida}}{T_{b,salida}} \quad (20)$$

### 5.1.3 EXERGÍA.

En todo proceso termodinámico la cantidad de energía no es consumida en su totalidad para producir un trabajo, es decir, en un proceso real hay una capacidad para realizar un trabajo inferior al esperado si toda la energía contribuyera a ello. Es así que se introduce el término exergía (del inglés *Availability*) como un parámetro de medida de la calidad de energía. En términos termodinámicos, la exergía es la eficiencia energética para producir un máximo trabajo útil por interacción del sistema y su entorno (Bencid et al., 2021).

Antes de proceder con la deducción matemática de la exergía, es necesario definir conceptos relacionados a dicha propiedad tal como estado de referencia, estado muerto y ciclo de Carnot.

### *5.1.3.1 ESTADO DE REFERENCIA.*

Es el estado para el cual el potencial de convertir la energía en trabajo es nulo, normalmente esto corresponde al medio circundante o ambiente (Bencid et al., 2021).

### *5.1.3.2 ESTADO MUERTO.*

Es el estado de equilibrio al que un sistema termodinámico con condiciones diferentes al estado de referencia evoluciona hasta consumir su potencial de realizar trabajo (Sandoval & Avila, 2016).

### *5.1.3.3 CICLO DE CARNOT.*

Es un ciclo termodinámico propuesto por Sadi Carnot en 1824 en el cual se absorbe calor desde una fuente de mayor temperatura y cede calor hacia una de menor temperatura produciendo un trabajo sobre el exterior. El ciclo de Carnot es un proceso reversible que consta de cuatro etapas en la siguiente secuencia: expansión isotérmica (a temperatura constante), expansión adiabática (con aislamiento térmico), compresión isotérmica y compresión adiabática (Atarés Huerta, 2021).

Una vez definido los conceptos necesarios, y utilizando las últimas referencias mencionadas, se procede a encontrar la ecuación de balance exergético. Matemáticamente la exergía se puede expresar como el máximo trabajo que se puede realizar en un sistema que es igual al calor transferido por un rendimiento máximo alcanzable en el sistema, es decir:

$$W_{max} = Q * \eta_c \quad (21)$$

En la notación anterior se ha introducido el rendimiento máximo como resultado del ciclo de Carnot. Por lo tanto, para definir este rendimiento máximo se procede



a utilizar la definición de entropía y considerar el recorrido del ciclo de Carnot como procesos que van desde el punto A hasta el punto D.

La expansión isotérmica, desde el punto A hasta el punto B, implica que se absorbe calor desde la fuente caliente dado por:

$$Q_1 = \int_A^B T_1 dS = T_1(S_B - S_A) \quad (22)$$

La expansión adiabática, desde el punto B hasta el punto C, no conlleva calor al ser un proceso de aislamiento térmico, simplemente la temperatura caliente  $T_1$  se enfría hasta llegar a la temperatura  $T_2$ , es decir:

$$Q_2 = 0 \quad (23)$$

La compresión isotérmica, desde el punto C hasta el punto D, implica que se cede calor hacia la fuente fría. Nótese que la entropía en el punto C y D, es igual a la entropía en el punto B y A, respectivamente. Por lo tanto, el calor de esta etapa está dado por:

$$Q_3 = \int_C^D T_2 dS = T_2(S_D - S_C) = T_2(S_A - S_B) \quad (24)$$

Finalmente, la compresión adiabática, desde el punto D hasta el punto A, no conlleva calor al ser un proceso de aislamiento térmico, la temperatura fría  $T_2$  se calienta hasta llegar a la temperatura  $T_1$ , es decir:

$$Q_4 = 0 \quad (25)$$

Por lo tanto, el rendimiento máximo en el ciclo de Carnot, se define como el cociente del trabajo realizado y el calor absorbido. Matemáticamente, esto se expresa como:

$$\eta_c = \frac{W_C}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4}{Q_1} \quad (26)$$

Reemplazando los valores de calor de cada etapa se obtiene:

$$\eta_C = \frac{T_1(S_B - S_A) + T_2(S_A - S_B)}{T_1(S_B - S_A)} = \frac{(T_1 - T_2)(S_B - S_A)}{T_1(S_B - S_A)} \quad (27)$$

Simplificando, se obtiene que el rendimiento máximo en el ciclo de Carnot es:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (28)$$

donde,

$T_2$       Temperatura de la fuente fría [K].

$T_1$       Temperatura de la fuente caliente [K].

Reemplazando esta última igualdad, se obtiene la expresión de la exergía (Ex) como:

$$E_x = W_{max} = Q \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \quad (29)$$

Debido al uso que se ha hecho del término entropía para llegar a la definición matemática de la exergía, se puede definir a esta última propiedad como la eficiencia de la segunda ley de la termodinámica.

Al analizar la última ecuación, se observa que la exergía es cero en un proceso reversible mientras que para los procesos irreversibles debe ser mayor que cero. Sin embargo, si se trata de un proceso irreversible la exergía se consume hasta llegar al estado muerto, es decir que esta propiedad no puede ser generada pero sí destruida en los procesos termodinámicos.

Ante lo expuesto, se entiende que la exergía no es una cantidad conservativa como la masa y la energía. De esta forma al aplicar la ecuación general de balance el término de destrucción no es nulo como resultado de los procesos irreversibles. Por lo tanto, la ecuación de balance de exergía se define por la siguiente relación:

$$\frac{dE_x}{dt} = \dot{E}_{x_{entrada}} - \dot{E}_{x_{salida}} - \dot{E}_{x_{destruida}} \quad (30)$$

donde,

$\frac{dE_x}{dt}$	Tasa de cambio de exergía acumulada en el sistema [J/h].
$\dot{E}_{x_{entrada}}$	Flujo de exergía transferida hacia el sistema a través de la frontera [J/h].
$\dot{E}_{x_{salida}}$	Flujo de exergía transferida fuera del sistema a través de la frontera [J/h].
$\dot{E}_{x_{destruida}}$	Velocidad de exergía destruida en el sistema causada por irreversibilidades internas [J/h].

El flujo de exergía puede atravesar las fronteras de un sistema mediante tres formas: por transferencia de calor, trabajo y transferencia de masa.

La exergía asociada a la transferencia de calor es definida como:

$$\dot{E}_{x_{Q,entrada}} = \dot{Q}_{entrada} \left( 1 - \frac{T_0}{T_{b,entrada}} \right) \quad (31)$$

donde,

$T_0$	Temperatura evaluada en el estado muerto [K].
$T_{b,entrada}$	Temperatura absoluta en la frontera cuando el calor es transferido hacia el sistema [K].

Por otra parte, la exergía asociada al trabajo es la diferencia del trabajo total del sistema menos el trabajo realizado sobre los alrededores, es decir:

$$\dot{E}_{x_{W,salida}} = \dot{W}_{salida} - \dot{W}_{frontera} \quad (32)$$

En donde  $\dot{W}_{salida}$  mantiene la definición dada en el balance de energía. El trabajo realizado por el sistema en los alrededores depende de un cambio de volumen del sistema, por lo que:

$$\dot{W}_{frontera} = P_0 \frac{dV}{dt} \quad (33)$$

donde,

$P_0$  Presión evaluada en el estado muerto [N/m<sup>2</sup>].

$\frac{dV}{dt}$  Tasa de cambio de volumen del sistema [m<sup>3</sup>/h].

Reemplazando la última ecuación, se obtiene que la exergía asociada al trabajo es:

$$\dot{E}_{xW,salida} = \dot{W}_{salida} - P_0 \frac{dV}{dt} \quad (34)$$

Por último, para obtener la exergía asociada a la transferencia de masa se considera la exergía ( $E_x$ ) como el producto de la masa ( $m$ ) por la exergía específica ( $e_x$ ), es decir:

$$E_x = m * e_x \quad (35)$$

De esta forma, el flujo de exergía que entra al sistema y sale del sistema por transferencia de masa, respectivamente, es:

$$\dot{E}_{x m,entrada} = \dot{m}_{entrada} e_{x entrada} \quad (36)$$

$$\dot{E}_{x m,salida} = \dot{m}_{salida} e_{x salida} \quad (37)$$

donde,

$e_{x entrada}$  Exergía específica hacia el sistema a través de la frontera [J/kg].

$e_{x salida}$  Exergía específica desde el sistema a través de la frontera [J/kg].

Reemplazando las ecuaciones obtenidas el balance exergético tiene la siguiente forma:

$$\frac{dE_x}{dt} = \dot{Q}_{entrada} \left( 1 - \frac{T_0}{T_{b,entrada}} \right) - \dot{W}_{salida} + P_0 \frac{dV}{dt} + \dot{m}_{entrada} e_{x\ entrada} - \dot{m}_{salida} e_{x\ salida} - \dot{E}_{x\ destruida} \quad (38)$$

En donde las exergías específicas de entrada y salida están dadas por:

$$e_{x\ entrada} = (h_{entrada} - h_0) - T_0(s_{entrada} - s_0) + \frac{v_{entrada}^2}{2} + gz_{entrada} \quad (39)$$

$$e_{x\ salida} = (h_{salida} - h_0) - T_0(s_{salida} - s_0) + \frac{v_{salida}^2}{2} + gz_{salida} \quad (40)$$

donde,

$h_{entrada}$  Entalpía específica del fluido cuando la masa es transferida hacia el sistema [J/kg].

$h_{salida}$  Entalpía específica del fluido cuando la masa es transferida desde el sistema [J/kg].

$s_{entrada}$  Entropía específica del fluido entrando a temperatura absoluta y presión de entrada al sistema [J/kg-K].

$s_{salida}$  Entropía específica del fluido saliendo a temperatura absoluta y presión de salida desde el sistema [J/kg-K].

$h_0$  Entalpía específica en el estado muerto [J/kg].

$T_0$  Temperatura absoluta en el estado muerto [K].

$s_0$  Entropía específica en el estado muerto [J/kg-K].

$v$  Velocidad del fluido [m/h].

$g$  Valor de la gravedad [m/h<sup>2</sup>].

z            Altura o elevación [m].

Normalmente los términos de velocidad y elevación se desprecian dando como resultado una expresión reducida de la exergía específica. Cabe indicar que estos términos se pueden transformar en trabajo útil con los dispositivos apropiados quedando fuera del balance exergético.

Respecto a la velocidad de exergía destruida, ésta está ligada con la velocidad de entropía generada puesto que ambas se presentan en procesos irreversibles, mientras que la exergía es destruida por realizar un trabajo útil, la entropía es generada por dicho trabajo, es decir:

$$\dot{E}_{x_{destruida}} = T_0 \dot{S}_{generada} \quad (41)$$

#### *5.1.4 ECONOMÍA DE LA ENERGÍA.*

Una vez establecidos los balances de masa, energía, entropía y exergía es necesario determinar los costos ligados a las variables involucradas en los balances mencionados. Para ello, se utiliza un método económico termodinámico denominado análisis exergo económico en el que se le asignan costos específicos a cada componente presente en el proceso industrial. El análisis exergo económico es una herramienta propuesta en la ingeniería en la que se combina el análisis financiero y el balance de exergía para lograr un diseño efectivo de conversión de energía (Effatpanah et al., 2022). Cabe indicar que conforme lo indica (Zaresharif et al., 2022) y (Effatpanah et al., 2022), el método considera tres características, que se detallarán a continuación, las cuales son:

- La exergía y los costos unitarios de exergía.
- La eficiencia exergética, y
- Las ecuaciones auxiliares de costos para cada componente.

Es necesario mencionar que, las definiciones y ecuaciones respecto al análisis exergoeconómico que en adelante se muestran, se basan en (Hernández-Mora et al., 2019), (Fierro et al., 2020), (Zaresharif et al., 2022) y (Effatpanah et al., 2022).

Considerando la ecuación general de balance, el balance de costo para cada componente de un determinado sistema, el cual normalmente recibe calor y produce trabajo, se puede escribir como:

$$\sum_{salida} \dot{C}_s + \dot{C}_W = \sum_{entrada} \dot{C}_e + \dot{C}_Q + \dot{Z} \quad (42)$$

donde,

$\dot{C}_s$  Costo exergo económico de flujo de salida [USD/h].

$\dot{C}_W$  Costo exergo económico de trabajo [USD/h].

$\dot{C}_e$  Costo exergo económico de flujo de entrada [USD/h].

$\dot{C}_Q$  Costo exergo económico de calor [USD/h].

$\dot{Z}$  Suma de los costos de inversión de capital y de operación y mantenimiento [USD/h].

El costo exergo económico se define como el producto del costo exergo económico unitario y el flujo de exergía.

$$\dot{C} = c\dot{E}_x \quad (43)$$

Por otra parte  $\dot{Z}$  puede exponerse en base a su definición, es decir:

$$\dot{Z} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM} \quad (44)$$

Por lo que el costo de inversión de capital  $\dot{Z}^{CI}$  y las tasas de costos de operación y mantenimiento  $\dot{Z}^{OM}$  para cada componente se calcula por las siguientes ecuaciones:

$$\dot{Z}_k^{CI} = \frac{TCI * CRF * PEC_k}{\tau * \sum PEC_k} \quad (45)$$

$$\dot{Z}_k^{OM} = \frac{\varphi * TCI * CELF * PEC_k}{\tau * \sum PEC_k} \quad (46)$$

donde,

$TCI$  Capital total de inversión [USD].

$CRF$  Factor de recuperación de capital [dlmn].

$PEC_k$  Costo de compra del equipo del componente k [USD].

$\tau$  Tiempo operativo anual del sistema [h].

$\varphi$  Factor de mantenimiento [dlmn].

$CELF$  Factor de nivelación de escalada constante [dlmn].

El factor de recuperación de capital puede tomarse económicamente como el valor presente ( $V_p$ ) al anualizarse ( $A_n$ ) a una tasa anual  $r$ , es decir:

$$CRF = \frac{A_n}{V_p} = \frac{i(1+i)^{t_s}}{(1+i)^{t_s} - 1} \quad (47)$$

En la ecuación anterior, por termodinámica económica,

$i$  Tasa de descuento efectiva que refleja la relación de los valores futuros y presentes [dlmn].

$t_s$  Vida económica del sistema [años].

El factor de nivelación de escalada constante se calcula por la siguiente ecuación:

$$CELF = \frac{K(1 - K^{t_s})CRF}{1 - K} \quad (48)$$

En donde  $t_s$  tiene la definición anteriormente mencionada y  $K$  es una constante que se calcula por:



$$K = \frac{1 + i_n}{1 + i} \quad (49)$$

donde,

$i_n$  Factor de escalamiento nominal [dlmn].

Este factor puede simbolizar el impacto debido al agotamiento de los recursos, la presencia de nuevas tecnologías, el aumento de la demanda y la inflación. Por otra parte  $i$  mantiene la definición dada con anterioridad.

Por último, para cada componente se puede realizar una evaluación exergo económica utilizando un parámetro denominado factor exergo económico, que cuantifica de forma relativa el costo de un componente para el costo de destrucción de exergía. Su definición matemática es:

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_d} \quad (50)$$

donde,

$\dot{C}_d$  Tasa de costo de destrucción de exergía [USD/h].

La relación matemática de esta última variable es:

$$\dot{C}_d = c_F \dot{E}_{x_{destruida}} \quad (51)$$

donde,

$c_F$  Costo exergo económico unitario de combustible [USD/J].

Cabe indicar que un valor pequeño del factor exergo económico indica que las ineficiencias presentes en el componente deben ser reducidas, lo que implica una disminución de destrucción de exergía, aunque signifique sobrecoste de inversión. Por otra parte, un valor elevado de este parámetro significa que se puede reducir la inversión a cambio de una ineficiencia exergética en el sistema.

## 5.2 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE TEMPLE DE BALLESTAS EN LA FÁBRICA DE RESORTES VANDERBILT

Antes de describir los procesos relacionados en la fábrica de resortes Vanderbilt, es necesario mencionar que gran parte de la información descrita fue facilitada por personal de dicha empresa y en los respectivos departamentos.

La fábrica de resortes Vanderbilt es la primera empresa que nace del Grupo Industrial Graiman en 1962 bajo la necesidad de suplir a la industria automotriz en el Ecuador. Actualmente, y como empresa líder en el mercado de resortes, dicha empresa ha iniciado la transformación hacia la eficiencia energética en cada proceso que así lo amerite (Vanderbilt, 2022).

En este contexto, la materia prima para la producción de resortes es el acero. Una definición precisa del acero puede darse como una aleación de hierro que contiene carbono en una concentración que varía desde 0,02% hasta 2,1%. En esta definición queda expuesto que es el carbono quien convierte al hierro en acero. Sin embargo, es bien conocido que dicho componente puede tener varias clases y con distintas características, por lo que a nivel mundial estos aceros están sujetos a normas que son utilizados por el mercado internacional (Merino Casals, 2012). En la tabla 1 se muestra las normas que se aplican a los aceros.

**Tabla 1**

*Normas técnicas aplicadas al uso de aceros de construcción*

<b>Acrónimo</b>	<b>Institución</b>
AISI	American Iron and Steel Institute
ANSI	American National Standard Institute
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing Materials

AWS	American Welding Society
EN	European Committee for Standardization
NACE	National Association of Corrosion Engineers
SAE	Society of Automotive Engineers
UNS	Unified Numbering System
JIS	Japanese Industrial Standards

*Nota.* Esta tabla muestra las normas utilizadas para la adquisición de la materia prima. Adaptado de fichas técnicas de (Vanderbilt, 2022).

En el caso de la Fábrica de Resortes Vanderbilt, el acero como materia prima satisface las normas equivalentes de AISI 5160, ASTM 5160 y SAE 5160 dependiente del país de importación éstas toman una normativa nacional. Algunos de los países de los que normalmente se importa la materia prima para el proceso fabril son: Korea, China, México y Colombia. Una vez que se tiene el inventario de materia prima, las platinas se someten al proceso respectivo para lograr la producción de la empresa (Vanderbilt, 2022).

A continuación, en la figura 1 se muestra los procesos que intervienen en la transformación del acero en la producción de ballestas en la Fábrica de Resortes Vanderbilt.

### Figura 1

*Esquema de procesos en la producción de ballestas en la Fábrica de Resortes Vanderbilt*



*Nota.* Elaborado a partir de información oral obtenida en la Fábrica de Resortes Vanderbilt.

A continuación, se procede con una breve descripción de los procesos mostrados en la figura anterior. Dicha descripción se detalla con información de (Vanderbilt, 2022).

1. Conformado: En este grupo intervienen procesos tales como: corte, perforado, laminado y formación de orejas.
  - a. Corte: Las platinas de acero son cizalladas de acuerdo a una especificación de longitud. Los extremos de la platina son sometidos a un acabado, ya sea en frío o en caliente, para obtener una forma diamantada, forma de L o fresado en caliente.
  - b. Perforado: Para este proceso se realiza un previo calentamiento, de tal manera que la perforación central mediante punzonado sea fácil y rápida. Posterior a ello, y de forma muy similar, mediante prensas excéntricas con troqueles se procede con la perforación en los extremos.
  - c. Laminado: Las platinas de acero sufren un previo calentamiento y así deformar el lingote mediante estiramiento y desbaste pasando por una red de cilindros. Así se obtiene una disminución de la sección al ser alargado y aplastado.
  - d. Formación de orejas: También conocido como formación de ojos. Este proceso se inicia con dobleces en las máquinas formadoras y luego se ingresa en un horno con una temperatura de entre 810°C a 850°C.
2. Tratamientos térmicos: Los procesos relacionados en este grupo son: temple y revenido.
  - a. Temple: El producto en proceso se procede a incrementar la temperatura hasta aproximadamente 900°C y luego se enfría rápidamente en aceite.
  - b. Revenido: Después del temple, el resorte se introduce en un horno a baja temperatura para aliviar las tensiones internas del acero procesado.
3. Acabados superficiales: En este grupo se agrupan algunos procesos tales como: limpieza y granallado y pintado.

- a. Limpieza y granallado: Se realiza una limpieza superficial para eliminar la escoria producida por el revenido. El granallado es una limpieza realizada mediante esferas pequeñas de acero a alta velocidad, principalmente para hojas de ensamble y paquetes.
  - b. Pintado: Este proceso se realiza mediante aplicación electrostática, es decir, las partículas de pintura en polvo están cargadas eléctricamente y quedan adheridas a la superficie luego de pasar por un horno de curado de 220°C. Finalmente pasan por un extractor de calor.
4. Ensamblado: En este proceso todas las partes del resorte son ensambladas, utilizando una prensa hidráulica, a fin de obtener los paquetes de resorte que serán almacenados para posteriormente, mediante toma de muestras, someterlos a un control de calidad, como parte de los requerimientos de una excelencia de producto en el mercado tanto nacional como internacional.

De los procesos mencionados, el de mayor relevancia debido al alto consumo de energía está relacionado con los tratamientos térmicos, por lo que a continuación se realiza una descripción del mismo, especialmente el temple.

### *5.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO.*

El tratamiento térmico es un proceso en el que el metal es calentado y enfriado cíclicamente con el propósito de mejorar sus propiedades mecánicas. En este proceso se produce una alteración de la estructura interna del metal, lo que se traduce en las mejoras de las propiedades mencionadas, razón por la cual es de mucha importancia en la manufactura de productos con metales (Pérez et al., 2013).

El tratamiento térmico puede ser usado antes del proceso de formado, de tal manera que el metal sea ablandado y ayude con el formado mientras está caliente. Mientras tanto, en otros casos se utiliza para aliviar los efectos causados por el

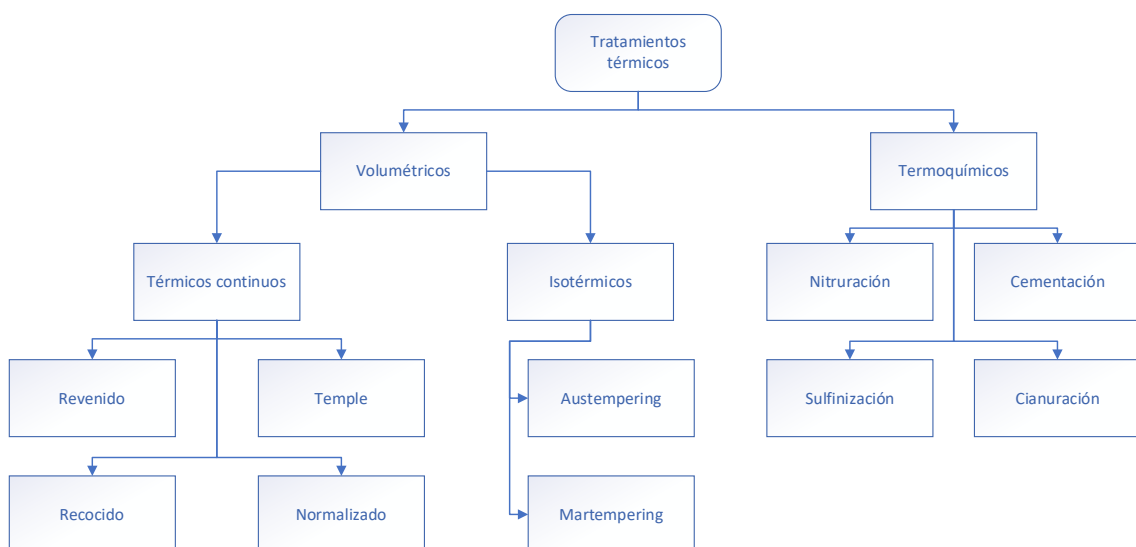
endurecimiento por deformación producidos durante el formado, de tal manera que el metal pueda sufrir deformaciones debido al uso posterior (Soria Aguilar et al., 2015).

Existen algunos autores que realizan una clasificación de los tratamientos dados a los aceros tomando en consideración varios factores, por lo que se pueden clasificar en: volumétricos, si afectan a la totalidad de la pieza metálica; superficiales, si el efecto da lugar solo en la superficie de la pieza metálica; termoquímicos, si afecta la composición química de la pieza objetivo (Martínez et al., 2016).

Sin embargo, al hablar de tratamientos térmicos se entiende que involucra a los volumétricos a pesar de que los termoquímicos también necesitan aporte de calor. Una clasificación más aceptada en la actualidad y que involucra a la temperatura se puede observar en la figura 2.

**Figura 2**

*Diagrama de clasificación general de los procesos de tratamientos térmicos*



*Nota.* Adaptado de (Martínez et al., 2016) y (Iglesias et al., 2014).

Sin embargo, para la aplicación en este trabajo se procede a describir solo el temple y el revenido debido a que son los procesos utilizados en la Fábrica de Resortes Vanderbilt.

### 5.2.1.1 *TEMPLADO DEL ACERO.*

También se le conoce como temple, es un tratamiento térmico en el cual el metal es calentado hasta determinada temperatura y luego enfriado súbitamente para conseguir un metal de determinadas características tal como mayor dureza, buena resistencia a esfuerzos y alta tenacidad. El proceso consiste en calentar la pieza metálica hasta una temperatura mayor a la temperatura de final de austenización. Cabe indicar que la materia prima es acero con una composición de carbono de entre 0.56% a 0.64%, por lo que en este caso la temperatura de final de austenización es conocida como punto crítico  $Ac_3$  y cuyo valor es de  $765^{\circ}C$  (Martínez-Pérez, 2016). En la figura 3 se puede observar el ingreso de una platina de acero para el respectivo inicio de proceso de temple.

**Figura 3**

*Horno de temple de la Fábrica de Resortes Vanderbilt*



*Nota.* Fotografía tomada por el autor en la Fábrica de Resortes Vanderbilt.

Posterior a ello, se debe mantener por un tiempo a dicha temperatura de tal forma que se consiga una homogenización en la estructura cristalina del metal. Dicho tiempo depende de la forma geométrica de la platina a tratar. En este punto toda la masa del acero se transforma en austenita. La temperatura de templado, mayor al punto crítico  $Ac_3$ , para este tipo de acero usado en la fábrica oscila entre 815 °C y 895 °C. Es importante mencionar que, si el metal es calentado a una temperatura superior a la de templado, se provoca un efecto de engrosamiento de grano; mientras tanto, una temperatura inferior a 815 °C provoca que la estructura cristalina no se transforme en austenita homogénea (Bohórquez, 2012).

Finalmente, la pieza metálica se somete a una determinada velocidad de enfriamiento de tal manera que la transformación de austenita a martensita sea completa. Para entender mejor esto, es necesario conocer la curva tiempo-temperatura-transformación, también conocida como curva TTT, del acero (ver Anexo 1). Si la velocidad de enfriamiento no es suficientemente rápida, la austenita se transforma en perlita pasando por las líneas de inicio ( $P_s$ ) y final ( $P_f$ ) de transformación en perlita o se transforma en bainita pasando por las líneas de inicio ( $B_s$ ) y final ( $B_f$ ) de transformación en bainita. Por otra parte, si la velocidad de enfriamiento es bastante rápida, la austenita se transforma en martensita pasando por las líneas de inicio ( $M_s$ ) y final ( $M_f$ ) de transformación en martensita (Patiño & Rosero, 2016).

Sin embargo, y sin desfavorecer la definición del acero, muchas veces se suma otros elementos de aleación. Es así que la curva TTT es diferente para cada composición de acero; no obstante, su comportamiento es muy similar (Montes Martos et al., 2014). En el caso del acero tratado en este proyecto, las composiciones químicas de otros elementos de aleación están dados en la tabla 2.



**Tabla 2***Composición química del acero tratado*

Elemento	Porcentaje en masa
Manganeso	0,65 – 1,00
Cromo	0,60 – 1,00
Silicio	0,15 – 0,35
Azufre	0,04 máx.
Fósforo	0,035 máx.
Cobre	0,30 máx.

*Nota.* Adaptado de fichas técnicas de (Vanderbilt, 2022).

La martensita es una fase metaestable del acero obtenida por enfriamiento brusco para evitar la difusión de los átomos de carbono desde la austenita. Por lo general, este enfriamiento se produce por inmersión. El enfriamiento por inmersión es la disminución de temperatura de la austenita de forma bastante rápida. La velocidad de enfriamiento depende de dos factores: el medio de inmersión y la velocidad de transmisión de calor en el interior del metal (Pérez et al., 2013).

Algunos medios de inmersión usados en la formación de martensita son: salmuera que es agua mezclada con una concentración superior al 5 % de cloruro de sodio ( $NaCl$ ), agua dulce, aceites y aire. El medio con mayor rapidez es la salmuera, mientras que el aire es el más lento. Sin embargo, entre mayor es la rapidez del medio hay mayor probabilidad de ocasionar esfuerzos internos, distorsión y grietas (Patiño & Rosero, 2016).

Respecto a la velocidad de transmisión de calor en el interior del cuerpo a enfriar, esta está relacionada con la forma y la cantidad de masa que tenga el acero. Además, se debe considerar al coeficiente de conductividad térmica  $k$  ya que a diferentes concentraciones de carbono en el acero o los aceros de baja o alta aleación con diferentes metales existe una notable variación de  $k$  (Bohórquez, 2012).

En la Fábrica de Resortes Vanderbilt se utiliza el aceite de temple, tal como se puede observar en la figura 4, el cual es un compuesto elaborado con bases de lubricantes parafínicos derivados de aceites de petróleo y aditivos especiales como transferentes de calor para obtener excelentes propiedades en el proceso de templado. Además, la viscosidad tiene un valor de 18 a 34 cSt a 40 °C y de 4,70 a 6,00 cSt a 100 °C. Por otra parte, el valor del coeficiente de conductividad térmica a 100 °C es de 18,1 W/m°C (Vanderbilt, 2022).

#### Figura 4

*Cuba de enfriamiento por inmersión en aceite de la Fábrica de Resortes Vanderbilt*



*Nota.* Fotografía tomada por el autor en la Fábrica de Resortes Vanderbilt.

El templado de piezas con forma geométrica compleja conduce al término templabilidad, pues puede parecer sencillo enfriar la superficie, pero no el interior de dicha pieza. La templabilidad es la capacidad de un acero de endurecerse hasta cierta profundidad por debajo de la superficie sometida a enfriamiento por

inmersión. Un acero con alto valor de templabilidad indica que no requiere de una velocidad alta de enfriamiento, pues en la curva TTT las líneas de inicio de transformación en perlita o bainita han sido desplazadas hacia la derecha de tal forma que el tiempo para que inicie dicha transformación es mayor. Los elementos que logran una buena templabilidad son los aleantes cromo, manganeso y molibdeno, y aunque en menor medida, el níquel (Martínez-Pérez, 2016).

### *5.2.1.2 REVENIDO.*

Comúnmente una vez formada la martensita, es decir el proceso de templeado, se aplica un proceso de revenido para disminuir la fragilidad y mejorar la ductilidad y tenacidad del acero. Además, alivia los esfuerzos internos en el acero producido por el temple. Este proceso afecta la microestructura del acero brindando bondades diferentes en el comportamiento mecánico y una presencia gradual de diferentes estados de ductilidad y resistencia (Rodríguez Baracaldo et al., 2016).

El revenido se produce al calentar el acero hasta menos que la temperatura eutectoide, también conocida como temperatura de inicio de austenización o punto crítico  $Ac_1$ , y luego mantenerla por un determinado tiempo para finalmente enfriarla lentamente. La temperatura y el tiempo permiten controlar el grado mejorado del acero, ya que se produce la difusión de los átomos de carbono en la martensita, esto se conoce como martensita templada (Villalobos et al., 2016).

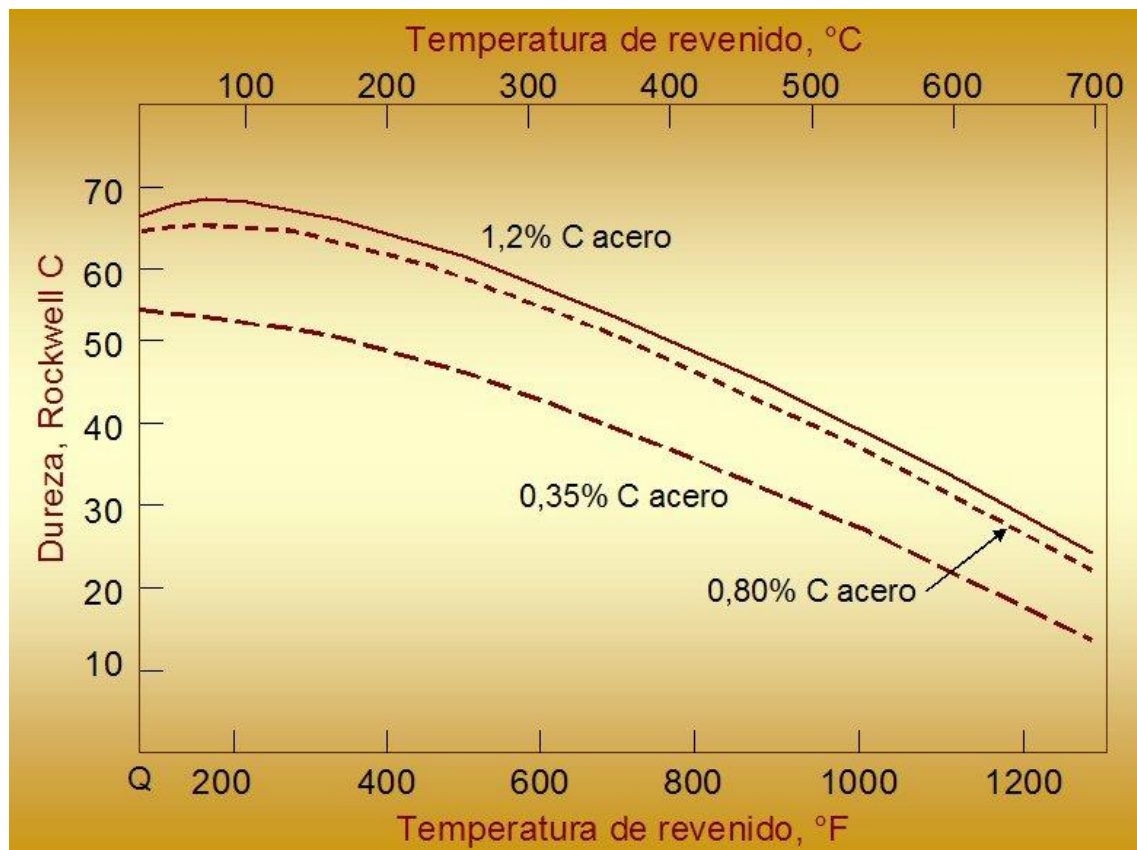
Cabe mencionar que el revenido afecta la dureza del acero de forma inversamente proporcional, a mayor temperatura de revenido menor grado de dureza y viceversa, por lo que generalmente se escoge una temperatura de revenido adecuada para obtener una específica dureza. Esto se observa debido a que hay un cambio en el tamaño de la estructura cristalina y produce una micro deformación de la red lo que resulta en una resistencia al desgaste (Echeverry Garzón et al., 2021).

En la fábrica de resortes Vanderbilt el punto crítico  $Ac_1$  tiene un valor de  $708^{\circ}\text{C}$ , por lo que la temperatura de revenido es inferior a dicho valor y depende de las características requeridas. Mientras tanto, el tiempo aplicado es de alrededor de una hora y el enfriamiento se da al aire libre. La dureza aceptada es la Rockwell C,

por lo que a continuación en la figura 5 se muestra un diagrama que relaciona la temperatura de revenido y la dureza mencionada a diversas concentraciones de carbono (Vanderbilt, 2022).

**Figura 5**

*Curva temperatura de revenido vs dureza para diferentes aceros*



*Nota.* Tomado de [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/pfcm13\\_2\\_2.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/pfcm13_2_2.html)

### 5.2.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL HORNO EN EL TRATAMIENTO TÉRMICO.

La aplicación del tratamiento térmico en metales se realiza mediante el uso de equipos que por lo general son hornos que pueden funcionar con electricidad o combustibles. Un horno es un dispositivo que permite calentar un metal hasta una temperatura deseada en un entorno cerrado mediante mecanismos de transferencia de calor como radiación, convección y conducción (Ascanio & Ariza Quiñonez, 2018).

En la fábrica de resortes Vanderbilt el proceso de calentamiento se realiza mediante el uso de hornos que funcionan con combustible. Los hornos que calientan el metal mediante combustibles son calentados directamente, es decir, las piezas son expuestas directamente a la llama originada por la combustión. El combustible comúnmente usado aceites en forma atomizada, como el diésel y el aceite combustible. Cabe mencionar que también se pueden usar gases, como el gas natural o el propano. Debido que la combustión necesita de un comburente, generalmente se realiza un ajuste a la mezcla aire-combustible u oxígeno-combustible para evitar la formación de óxido sobre el metal que está siendo calentado (Mariños Rosado et al., 2016).

Respecto al tamaño y capacidad del horno, se puede considerar que es de tipo por lote / batch. Los hornos por lotes están contruidos con una puerta que permite la carga y descarga de las piezas metálicas y el interior está formado por una cámara aislada en la que se produce el calentamiento del metal (Calvo, 2015). En la fábrica de resortes Vanderbilt, el horno usado está contruido con geometría de caja rectangular y con un tamaño definido.

El proceso de carga y descarga en el horno se caracteriza por una sincronización hombre-máquina para que la mayor parte del tiempo esté calentando las piezas en la cámara, lo que permite una mayor producción en un menor tiempo. En el caso de la fábrica de resortes Vanderbilt, el sistema utilizado es ingresar las piezas metálicas y retirarla cuando haya obtenido la temperatura deseada, pero sin dejar vacía la cámara de calentamiento. Es decir, en un momento determinado se saca una pieza caliente y en ese espacio se ingresa una pieza fría y así se va rotando y repitiendo el proceso por toda la cámara de calentamiento (Cabrera Gómez et al., 2018).

Por otra parte, estos hornos requieren de ambientes debidamente controlados para evitar la oxidación superficial, obstaculizar la descarburación y eliminar residuos que pudieren reaccionar. Por ello, la compuerta no está muy abierta para evitar ingreso de mayor oxígeno o en su defecto está totalmente cerrada teniendo un



indicador temporal para el momento en que una pieza debe ser retirada y una nueva debe ser ingresada (Iglesias et al., 2014).

De forma general, el horno para tratamiento térmico está conformado por un piso refractario y un piso aislante. El piso refractario consiste de ladrillos refractarios con dimensiones de 9 pulgadas de largo, 4,5 pulgadas de ancho y 2,5 pulgadas de alto. Nótese que el material refractario debe ser capaz de soportar el choque térmico ocasionado por las altas variaciones de temperatura. De manera similar, el piso aislante consiste de ladrillos aislantes con dimensiones de 9 pulgadas de largo, 4,5 pulgadas de ancho y 2,5 pulgadas de alto. Éstos están ubicados por debajo del material refractario y su función es evitar las pérdidas de calor (Vanderbilt, 2022).

De esta forma, la pared interior o cámara de calentamiento alcanza la temperatura deseada para el templado de la pieza de acero y la pared exterior se encuentra a temperatura ambiente sin causar daño a los trabajadores por superficie caliente. Cabe considerar que se debe tener mucho cuidado con las estufas cuando están en funcionamiento, pues éstas son observables interna como externamente (Peña et al., 2020).

### *5.2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN EL PROCESO DE TEMPLE.*

El carburante utilizado es un aceite combustible obtenido como residuo pesado de la destilación fraccionada a presión atmosférica. Dicho combustible llamado diésel, también denominado fuelóleo y en menor frecuencia como combustóleo, está compuesto por parafinas, olefinas y naftenos lo cual resulta en una composición química de más de 20 carbonos (Correía et al., 2015).

En el caso industrial, y especialmente en hornos, el diésel es el más utilizado en el funcionamiento de estos equipos. Como productos de la combustión se tiene el monóxido de carbono, dióxido de carbono y óxidos de azufre (Xu et al., 2019). Sin embargo, se puede adicionar algunos aditivos para mejorar la combustión y así reducir la cantidad de emisión producida. Esto puede resultar costoso pero

necesario en ciertos procesos industriales y amigable con el medio ambiente (Lehto et al., 2014).

Aunque la composición química del diésel es variante por yacimiento, la mayoría a ser utilizada como combustible tiene los porcentajes descritos en la tabla 3.

**Tabla 3**

*Composición química del combustible*

Elementos	Porcentaje en masa
Carbono	86,47
Hidrógeno	11,65
Oxígeno	0,27
Nitrógeno	0,24
Azufre	1,35
Cenizas	0,02
Relación C/H	7,42

*Nota.* Tomado de *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (pag 27-11), por Perry et al., 2009, The McGraw-Hill Companies.

Por otra parte, en la tabla 4 se muestra algunas características químicas y físicas del mismo combustible.

**Tabla 4**

*Propiedades físico químicas del combustible*

Propiedad	Descripción
Apariencia	Negro, aceitoso y viscoso
Estado físico	Líquido
Olor	Característico a destilado de petróleo
Poder calorífico inferior	9800 kcal/kg
Viscosidad a 16 °C	4 cSt

Punto de inflamación	40 °C – 88 °C
Temperatura de autoignición	263 °C
Gravedad específica	0,876 – 0,979

---

*Nota.* Adaptado de fichas técnicas de (Vanderbilt, 2022).

Por otra parte, y continuando con la iniciativa de la empresa de renovar la tecnología utilizada en los procesos de fabricación de resortes especialmente con productos amigables con el medio ambiente, el combustible propuesto es el gas natural.

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos compuesto de gases livianos de origen natural, de allí el nombre. A pesar de esto, el principal componente es el metano, del 79 % hasta el 97 %, y sus otros componentes como etano, propano, butano, nitrógeno, dióxido de carbono, vapor de agua, derivados del azufre y trazas de otros elementos cubren el porcentaje faltante. Muchos de estos elementos secundarios son separados durante la purificación y filtración, debido a que pueden causar problemas como condensación u obstrucción en los gaseoductos, combustión ineficiente, corrosión, etc., al final se obtiene un gas natural con un alto porcentaje de metano (Li et al., 2016).

Algunas de las ventajas del uso del gas natural es la baja emisión de dióxido de carbono en comparación con otros combustibles fósiles, la fácil extracción del yacimiento y la relativa sencillez de transporte a largas distancias. Los productos de la reacción química durante la combustión son dos moléculas de agua y una de dióxido de carbono (Chong et al., 2016).

A continuación, en la tabla 5 se muestra algunas características químicas y físicas del gas natural.



**Tabla 5**

*Propiedades físico químicas del gas natural*

<b>Propiedad</b>	<b>Descripción</b>
Peso molecular	18,2
Estado físico	Gas
Olor	Se detecta por presencia del mercaptano
Poder calorífico inferior	8300 kcal/m <sup>3</sup>
Poder calorífico superior	11000 kcal/m <sup>3</sup>
Relación de expansión	1 litro de líquido a 600 litros de gas
Temperatura de autoignición	537 °C
Densidad a 15 °C y 1 atm	0,668 kg/m <sup>3</sup>
Densidad (vapor) relativa al aire	0,61
Densidad (líquida) relativa al agua	0,554
Calor específico a presión constante	8,57 cal/mol °C
Calor específico a volumen constante	6,56 cal/mol °C

*Nota.* Adaptado de Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2 489:2009 (INEN, 2009).

## 6. MATERIALES Y METODOLOGÍA

En este apartado se aplica una metodología basada en el cálculo de balances de masa, energía, entropía y exergía en el horno de tratamientos térmicos al acero mediante el uso del software especializado denominado Matlab. A continuación, se realiza los cálculos con datos numéricos utilizando los combustibles de diésel así como de gas natural, que son el carburante utilizado en la empresa y el propuesto, respectivamente.

### *6.1 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL PROCESO DE TEMPLE*

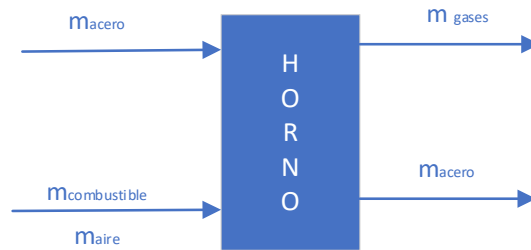
En primer lugar, se realiza los balances respectivos en relación al combustible utilizado por la fábrica de resortes Vanderbilt. Posterior a ello, se realiza dichos balances en relación al combustible alternativo, es decir, al gas natural.

#### *6.1.1 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL COMBUSTIBLE DIÉSEL (CASO BASE).*

Para el cálculo del balance de materia, en la figura 6 se muestra el diagrama de flujo de masa en el horno de tratamiento térmico. Cabe indicar que los cálculos fueron programados y obtenidos empleando la herramienta Matlab y su programación respectiva está desarrollada en el Anexo 2.

#### **Figura 6**

*Esquema del balance de masa en el horno de temple*



Debido a que es un proceso estacionario y siguiendo lo dicho por la ecuación (4), el balance se expresa de la siguiente forma:

$$\dot{m}_{entrada} = \dot{m}_{salida} \quad (53)$$

$$\dot{m}_{acero} + \dot{m}_{diésel} + \dot{m}_{aire} = \dot{m}_{acero} + \dot{m}_{gases} \quad (54)$$

Considerando que la masa de acero al entrar y salir en el proceso es la misma, ésta no influye por lo que se puede observar que el balance de materia depende de la reacción de combustión. Para ello, utilizando el dato del flujo másico de combustible de 3,5 gal/h y la gravedad específica media igual 0,9275 se obtiene que:

$$\dot{m}_{diésel} = 12,3 \frac{kg}{h}$$

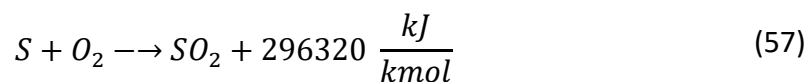
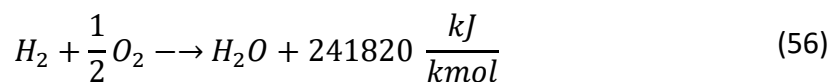
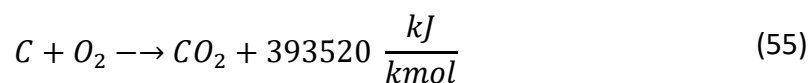
El hecho de que la reacción química es de vital importancia en este proceso, es mejor realizar un balance de flujos molares en especies atómicas. Para ello, es necesario considerar la composición química del diésel dada anteriormente y los pesos moleculares de cada especie.

Por lo tanto, el flujo molar de combustible es la suma de los flujos molares de las especies, es decir:

$$\dot{n}_{diésel} = 2,32 \frac{kmol}{h}$$

Cabe indicar que las cenizas se han menospreciado en estos cálculos.

Considerando que el nitrógeno presente en el diésel no reacciona, las reacciones químicas de combustión completa son:



Considerando que la composición del aire es 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno y que se añade un exceso del 20%, el flujo molar de aire tiene un valor de:

$$\dot{n}_{aire} = 9,15 \frac{kmol}{h}$$

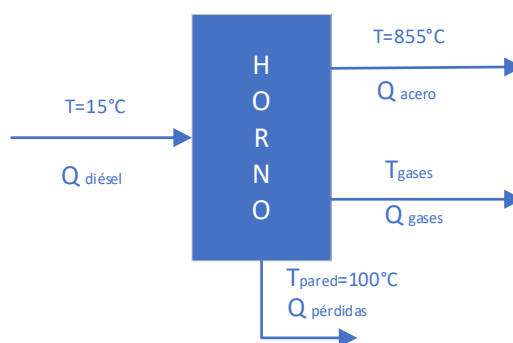
Por lo tanto, el flujo molar de gases tiene un valor de:

$$\dot{n}_{gases} = 11,38 \frac{kmol}{h}$$

Respecto al cálculo del balance de energía, se considera que no se realiza trabajo y la variación de energía se puede despreciar. A continuación, en la figura 7 se muestra el diagrama de flujo de energía en el horno de tratamiento térmico.

**Figura 7**

*Esquema del balance de energía en el horno de temple*



Realizando las consideraciones mencionadas, la ecuación (9) se transforma a la siguiente forma:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida} \quad (58)$$

$$\dot{Q}_{diésel} = \dot{Q}_{acero} + \dot{Q}_{pérdidas} + \dot{Q}_{gases} \quad (59)$$

En el cálculo del calor absorbido por las platinas es necesario considerar que cada platina tiene un área superficial y que se mantiene en el horno de temple por aproximadamente 15 minutos, lo que resulta en que cada hora el área superficial de cada platina debe ser multiplicada por 4.

El calor absorbido por el acero está dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{acero} = \varepsilon A_s \sigma (T_{acero}^4 - T_0^4) \quad (60)$$

El calor por pérdidas se calcula por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{pérdidas} = \frac{T_i - T_p}{\sum \frac{x}{kA}} \quad (61)$$

El calor del combustible está dado por la siguiente ecuación considerando que es una combustión completa.

$$\dot{Q}_{diésel} = \dot{m}_{diésel} * P_c \quad (62)$$

Mientras tanto, el calor de los gases producto de la reacción química es:

$$\dot{Q}_{gases} = \sum \dot{n}_p (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_p \quad (63)$$

Como se puede observar, para el cálculo del balance de energía es necesario algunas constantes físicas y del proceso. En el anexo 3 se muestra los valores representativos para el respectivo cálculo.

En los cálculos de la reacción química, es necesario algunos valores de entalpía que se encuentran tabulados, por lo que se han obtenidos y se muestran en el anexo 4. Es decir, los valores encontrados representan a las siguientes igualdades.

Calor emitido por el combustible:

$$\dot{Q}_{diésel} = 504340 \frac{kJ}{h}$$

Calor absorbido por el acero:

$$\dot{Q}_{acero} = 178050 \frac{kJ}{h}$$

Pérdidas de calor:

$$\dot{Q}_{pérdidas} = 2,4771 \frac{kJ}{hK} (T_i - 373,15K)$$

Calor en los gases:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{gases} = & 1,8323(\overline{h_{T,O_2}} - 8682) + 7,2316(\overline{h_{T,N_2}} - 8669) \\ & + 0,8855(-393520 + \overline{h_{T,CO_2}} - 9364) \\ & + 1,4216(-241820 + \overline{h_{T,H_2O}} - 9904) \\ & + 0,0052(-296320 + \overline{h_{T,SO_2}} - 9936) \end{aligned}$$

Realizando los productos y sumas correspondientes y reemplazando los valores en la ecuación (59) se tiene:

$$\begin{aligned} 504340 \frac{kJ}{h} = & 178050 \frac{kJ}{h} + 2,4771 \frac{kJ}{hK} (T_i - 373,15 K) + 1,8323 \overline{h_{T,O_2}} \\ & + 7,2316 \overline{h_{T,N_2}} + 0,8855 \overline{h_{T,CO_2}} + 1,4216 \overline{h_{T,H_2O}} + 0,0052 \overline{h_{T,SO_2}} \\ & - 794800 \frac{kJ}{h} \end{aligned}$$

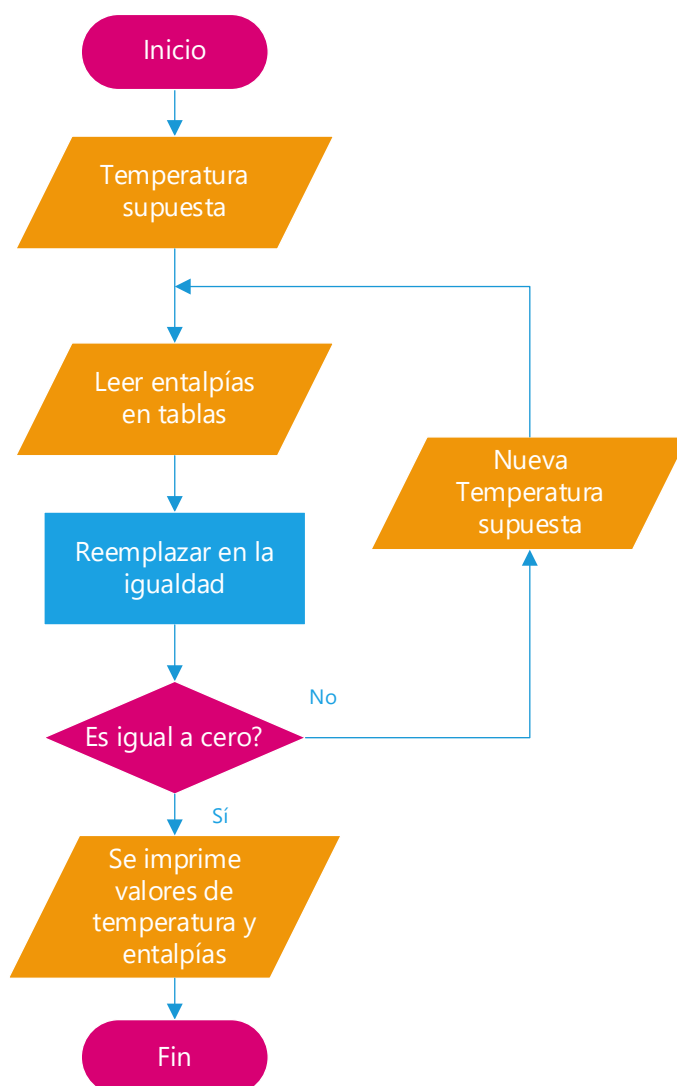
Reordenando los términos luego de realizar las operaciones correspondientes, se tiene:

$$2,4771T_i + 1,8323\overline{h_{T,O_2}} + 7,2316\overline{h_{T,N_2}} + 0,8855\overline{h_{T,CO_2}} + 1,4216\overline{h_{T,H_2O}} + 0,0052\overline{h_{T,SO_2}} = 1122000 \frac{kJ}{h}$$

En la figura 8 se presenta el diagrama de flujo para el algoritmo iterativo que permite encontrar la temperatura interior de la cámara de calentamiento y las entalpías de cada especie.

### Figura 8

*Diagrama de flujo de algoritmo de cálculo de temperatura y entalpía*



*Nota.* La temperatura supuesta representa a  $T_i$  y las entalpías se leen en los anexos correspondientes a cada especie.

Como se puede observar, la ecuación debe resolverse de forma iterativa, y los pasos a cumplir son los siguientes:

- Se escoge una temperatura  $T_i$  en grados Kelvin.
- Se busca las entalpías de cada especie a dicha temperatura escogida.
- Los valores se ingresan en la ecuación.
- Se verifica que cumple o no con la igualdad.

Por lo tanto, los valores de entalpía para cada especie se resumen en la tabla 6.

**Tabla 6**



Valores calculados de entalpía de sustancias reactantes y productos a la temperatura  $T_i=2679\text{ K}$

Sustancia	$\bar{h} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right)_T$
Oxígeno $\text{O}_2$	94055,7
Nitrógeno $\text{N}_2$	89555,2
Dióxido de carbono $\text{CO}_2$	142323,3
Vapor de agua $\text{H}_2\text{O}$	118572,4
Dióxido de azufre $\text{SO}_2$	143605,4

Nota. Elaborado a partir de interpolación de datos obtenidos de los anexos 6, 7, 8, 9.

Retomando el cálculo de las pérdidas de calor, su correspondiente valor es:

$$\dot{Q}_{\text{pérdidas}} = 5711,7 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

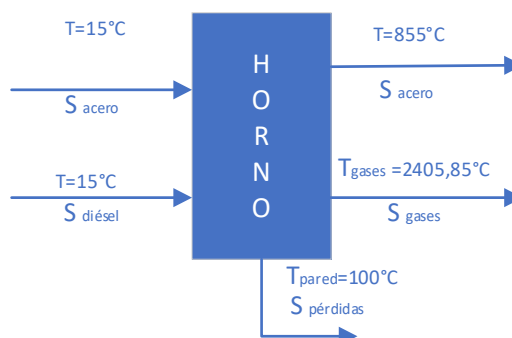
Mientras que el calor en los gases tiene un valor de:

$$\dot{Q}_{\text{gases}} = 320510 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Para el cálculo del balance de entropía se procede a mostrar en la figura 9 un diagrama del flujo de entropía en el horno de tratamiento de temple.

**Figura 9**

*Esquema del balance de entropía en el horno de temple*



De acuerdo al gráfico y considerando que es un proceso en estado estacionario la ecuación (12) se transforma en:

$$\dot{S}_{generada} = \dot{S}_{salida} - \dot{S}_{entrada} \quad (64)$$

La entropía de salida está dada por:

$$\dot{S}_{salida} = \dot{S}_{acero,out} + \dot{S}_{gases} + \dot{S}_{pérdidas} \quad (65)$$

Mientras que la entropía de entrada es:

$$\dot{S}_{entrada} = \dot{S}_{acero,in} + \dot{S}_{diésel} \quad (66)$$

Considerando que  $dS = \frac{\delta Q}{T}$  se procede a escribir las ecuaciones correspondientes.

El cambio de entropía para el acero está dado por:

$$\dot{S}_{acero,out} - \dot{S}_{acero,in} = \frac{4}{3} \varepsilon A_s \sigma (T_{acero}^3 - T_0^3) \quad (67)$$

La entropía resultante por el calor perdido se calcula mediante la ecuación:

$$\dot{S}_{pérdidas} = \frac{(T_i - T_p)^2}{T_i * T_p \sum \frac{x}{kA}} \quad (68)$$

Mientras tanto la entropía del combustible es el producto del flujo molar por la entropía específica a la temperatura a la que ingresa, es decir:

$$\dot{S}_{diésel} = \dot{n}_{diésel} * \bar{s}^0 \quad (69)$$

Por último, considerando que la presión del proceso es igual a la presión atmosférica  $\ln\left(y \frac{P}{P_{ref}}\right) = \ln y$ , la entropía por los gases viene dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{S}_{gases} = \sum \dot{n}(\bar{s}^0 - \bar{R} \ln y)_p - \sum \dot{n}(\bar{s}^0 - \bar{R} \ln y)_{aire} \quad (70)$$

Para esta última ecuación es necesario algunos valores de entropía que mediante interpolación se han obtenidos, mientras que la fracción molar se ha procedido con el cálculo respectivo. Dichos valores se encuentran resumidos en la tabla 7.

**Tabla 7**

*Valores calculados de flujo molar, fracción molar y entropía específica de sustancias reactantes y productos a determinada temperatura*

Sustancia	$\dot{n}_p \left( \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right)$	$y$	$\bar{s}^0 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} * \text{K}} \right)$
Gases T = 2679 K			
Oxígeno O <sub>2</sub>	1,8323	0,1610	279,911
Nitrógeno N <sub>2</sub>	7,2316	0,6357	262,613
Dióxido de carbono CO <sub>2</sub>	0,8855	0,0778	327,065
Vapor de agua H <sub>2</sub> O	1,4216	0,1250	280,033
Dióxido de azufre SO <sub>2</sub>	0,0052	0,0005	277,135
Aire T = 288,15 K			
Oxígeno O <sub>2</sub>	1,9215	0,21	204,013
Nitrógeno N <sub>2</sub>	7,2285	0,79	190,491

*Nota.* Elaborado a partir del balance molar del diésel y la interpolación de datos obtenidos de los anexos 6, 7, 8, 9.

Por lo tanto, los valores resultantes corresponden a la siguiente descripción.

Cambio de entropía para el acero:

$$\dot{S}_{acero,out} - \dot{S}_{acero,in} = 207,8 \frac{\text{kJ}}{\text{hK}}$$

Entropía del combustible:

$$\dot{S}_{diésel} = 1520,6 \frac{\text{kJ}}{\text{hK}}$$

Entropía por pérdidas de calor:

$$\dot{S}_{p\acute{e}rdidas} = 13,2 \frac{kJ}{hK}$$

Entropía por los gases:

$$\dot{S}_{gases} = 1391,8 \frac{kJ}{hK}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (64) según lo indicado por las ecuaciones (65) y (66), se tiene que:

$$\dot{S}_{generada} = 207,8 \frac{kJ}{hK} + 1391,8 \frac{kJ}{hK} + 13,2 \frac{kJ}{hK} - 1520,6 \frac{kJ}{hK}$$

Finalmente, la entropía generada tiene un valor de:

$$\dot{S}_{generada} = 92,2 \frac{kJ}{hK}$$

Con el valor de la entropía generada y la temperatura absoluta al inicio del proceso y aplicando la ecuación (42) se calcula la exergía destruida en el proceso de temple mediante el horno.

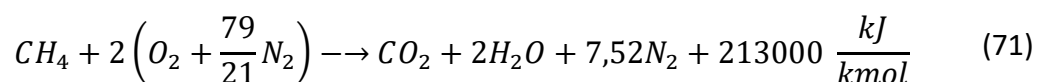
$$\dot{E}_{x\text{destruida}} = 288,15K * 92,2 \frac{kJ}{hK}$$

En otras palabras, el trabajo útil en el proceso tiene un valor de:

$$\dot{E}_{x\text{destruida}} = 26567,43 \frac{kJ}{h}$$

### 6.1.2 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL COMBUSTIBLE GAS NATURAL.

El caso del balance de masa para el combustible gas natural, se considera su composición como metano. Por lo tanto, se procede a realizar un balance molar, dada la siguiente reacción:



Según la ecuación química mostrada y utilizando como base de cálculo al flujo molar del combustible, el balance de flujos molares tiene los siguientes valores:

$$\text{Flujo molar } CH_4 = \dot{n}_{CH_4}$$

Flujo molar de oxígeno:

$$\dot{n}_{O_2} = 2\dot{n}_{CH_4}$$

Flujo molar de nitrógeno entrante:

$$\dot{n}_{N_2} = 7,52\dot{n}_{CH_4}$$

Flujo molar de aire:

$$\dot{n}_{aire} = 9,52\dot{n}_{CH_4}$$

Flujo molar de dióxido de carbono:

$$\dot{n}_{CO_2} = \dot{n}_{CH_4}$$

Flujo molar de agua:

$$\dot{n}_{H_2O} = 2\dot{n}_{CH_4}$$

Flujo molar de nitrógeno saliente:

$$\dot{n}_{N_2} = 7,52\dot{n}_{CH_4}$$

Flujo molar de gases:

$$\dot{n}_{gases} = 10,52\dot{n}_{CH_4}$$

Para el balance de energía, se debe considerar que el proceso de calentamiento de las piezas de acero es el mismo, por lo que el calor perdido en el proceso y el calor absorbido por las platinas de metal mantienen su valor. Todo esto se resume en que la diferencia del calor de los gases y el calor cedido por el combustible diésel

debe ser igual a la diferencia del calor de los gases y el calor cedido por el gas natural.

$$\dot{Q}_{r \rightarrow p \text{ CH}_4} = \dot{Q}_{\text{diésel}} - \dot{Q}_{\text{gases}}$$

Es decir:

$$\sum \dot{n}_p (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_p - \sum \dot{n}_r (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_r = 504340 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} - 320510 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$\sum \dot{n}_p (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_p - \sum \dot{n}_r (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_r = 183830 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Los datos para la reacción química del metano a la temperatura de entrada de 288,15 K y a la temperatura de salida de 2679 K se calculan mediante interpolación y se pueden observar en la tabla 8.

**Tabla 8**

*Valores calculados de entalpías en la reacción del gas natural*

Sustancia	$\bar{h}_f^0 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right)$	$\bar{h} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right)$	$\bar{h} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right)$	$\bar{h}^0 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right)$
		$T = 2679 \text{ K}$	$T = 288,15 \text{ K}$	$T = 298,15 \text{ K}$
Metano CH <sub>4</sub>	-74850	-	-	-
Oxígeno O <sub>2</sub>	0	-	8384,4	8682
Nitrógeno N <sub>2</sub>	0	89555,2	8373,8	8669
Dióxido de carbono CO <sub>2</sub>	-393520	142323,3	-	9364
Vapor de agua H <sub>2</sub> O	-241820	118572,4	-	9904

*Nota.* Elaborado a partir de interpolación de datos obtenidos de los anexos 5, 6, 7, 8, 9.

Por tanto, se tiene:

$$159065 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} * \dot{n}_{\text{CH}_4} = 183830 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Es decir que el valor del flujo molar del metano como combustible es:

$$\dot{n}_{CH_4} = 1,16 \frac{kmol}{h}$$

Con esta información, se procede a realizar el cálculo de entropía con las ecuaciones desde (64) hasta (70) reemplazando el combustible por el gas natural.

Algunos de estos valores no cambian tal como la variación de entropía para el acero y la entropía resultante por el calor perdido. Por lo tanto, se debe calcular la entropía del combustible que es el gas natural y la entropía de los gases resultantes con las ecuaciones (69) y (70).

Para obtener dichos valores es necesario consultar algunos datos tabulados, y luego calcularlos mediante interpolación, dichos valores se muestran en la tabla 9.

**Tabla 9**

*Valores calculados de flujo molar, fracción molar y entropía absoluta en la reacción del gas natural*

Sustancia	$\dot{n}_p \left( \frac{kmol}{h} \right)$	$y$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$
Productos T = 2679 K			
Dióxido de carbono CO <sub>2</sub>	1,16	0,095	327,065
Vapor de agua H <sub>2</sub> O	2,32	0,190	280,033
Nitrógeno N <sub>2</sub>	8,72	0,715	262,613
Reactantes T = 288,15 K			
Metano CH <sub>4</sub>	1,16	1	186,16
Oxígeno O <sub>2</sub>	2,32	0,21	204,013
Nitrógeno N <sub>2</sub>	8,72	0,79	190,491

*Nota.* Elaborado a partir del balance molar del gas natural y la interpolación de datos obtenidos de los anexos 5, 6, 7, 8, 9.

Los valores calculados y necesarios para la entropía generada son los siguientes.

Cambio de entropía para el acero:

$$\dot{S}_{acero,out} - \dot{S}_{acero,in} = 207,8 \frac{kJ}{hK}$$

Entropía por pérdidas de calor:

$$\dot{S}_{pérdidas} = 13,2 \frac{kJ}{hK}$$

Entropía del combustible:

$$\dot{S}_{CH_4} = 215,9 \frac{kJ}{hK}$$

Entropía por los gases:

$$\dot{S}_{gases} = 3398,1 \frac{kJ}{hK}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (64), se calcula la entropía generada:

$$\dot{S}_{generada} = 207,8 \frac{kJ}{hK} + 3398,1 \frac{kJ}{hK} + 13,2 \frac{kJ}{hK} - 215,9 \frac{kJ}{hK}$$

Finalmente, la entropía generada tiene un valor de:

$$\dot{S}_{generada} = 3403,2 \frac{kJ}{hK}$$

Con este valor de entropía generada por el combustible gas natural y aplicando la ecuación (42), la exergía destruida en este proceso planteado tiene el siguiente valor.

$$\dot{E}_{x\text{destruida}} = 288,15K * 3403,2 \frac{kJ}{hK}$$

En otras palabras, el trabajo útil en el proceso con gas natural tiene un valor de:

$$\dot{E}_{x\text{destruida}} = 980632,08 \frac{kJ}{h}$$



## 6.2 ESTUDIO TERMO ECONÓMICO DEL CAMBIO DE COMBUSTIBLE

Una vez calculada la exergía se procede con el cálculo del factor exergo económico, pero antes la exergía debe ser transformada por unidad de masa de combustible.

Si la exergía destruida es de 26567,43 kJ/h con un caudal másico de diésel de 12,3 kg/h, se tiene que por cada kilogramo de diésel la exergía destruida es de:

$$E_{x/F} = 2160 \frac{kJ}{kg \text{ diésel}}$$

Por otra parte, se tiene que el coste del diésel es de 0,462 USD por litro de combustible, lo que significa que:

$$C_F = 0,50 \frac{USD}{kg \text{ diésel}}$$

Con estos valores resulta que el coste exergo económico unitario del diésel tiene un valor de:

$$c_F = 2,3 * 10^{-4} \frac{USD}{kJ}$$

Es así que el coste exergo económico de la exergía destruida con el diésel se calcula con la ecuación (52).

$$\dot{C}_d = 2,3 * 10^{-4} \frac{USD}{kJ} * 26567,43 \frac{kJ}{h}$$

$$\dot{C}_d = 6,11 \frac{USD}{h}$$

Gracias a los datos brindados por la empresa, se tiene que el costo de operación es de 3,35 dólares por unidad producida. A ello, tómesese en cuenta que son cuatro unidades producidas por hora. Por lo tanto, el costo de operación por unidad de tiempo es:

$$\dot{Z}^0 = 3,35 \frac{USD}{un} * 4 \frac{un}{h}$$

$$\dot{Z}^0 = 13,4 \frac{USD}{h}$$

Mientras tanto, el costo de mantenimiento es de 12700 USD cada 2 años. Considerando 52 semanas laborales, 5 días a la semana y 8 horas por día de trabajo, se tiene que el costo de mantenimiento por unidad de tiempo es:

$$\dot{Z}^M = 6350 \frac{USD}{año} * \frac{1 año}{52 sem} * \frac{1 sem}{5 día} * \frac{1 día}{8 h}$$

$$\dot{Z}^M = 3,05 \frac{USD}{h}$$

El costo de operación y mantenimiento corresponde a la suma de los dos valores anteriores:

$$\dot{Z}^{OM} = 16,45 \frac{USD}{h}$$

Por tanto, el valor del factor exergo económico aplicando la ecuación (51) es de:

$$f_{OM} = \frac{16,45 \frac{USD}{h}}{16,45 \frac{USD}{h} + 6,11 \frac{USD}{h}}$$

$$f_{OM} = 0,73$$

En el caso del gas natural, el coste a la fecha es de:

$$C_{CH_4} = 0,19 \frac{USD}{kg CH_4}$$

El flujo másico de combustible es el producto del flujo molar por el peso molecular, es decir:

$$\dot{m}_{CH_4} = 1,16 \frac{kmol}{h} * 16,032 \frac{kg}{kmol}$$

$$\dot{m}_{CH_4} = 18,6 \frac{kg}{h}$$

Mientras tanto, la exergía destruida en el proceso con gas natural que tiene un valor de 980632,08 kJ/h, al transformarla por unidad de kilogramo tiene un valor de:

$$E_{x/CH_4} = 52722 \frac{kJ}{kg CH_4}$$

Por lo que el coste exergo económico unitario del gas natural tiene un valor de:

$$c_F = 3,6 * 10^{-6} \frac{USD}{kJ}$$

Es así que el coste exergo económico de la exergía destruida con el gas natural se calcula con la ecuación (52).

$$\dot{C}_d = 3,6 * 10^{-6} \frac{USD}{kJ} * 980632,08 \frac{kJ}{h}$$

$$\dot{C}_d = 3,53 \frac{USD}{h}$$

En el caso del combustible gas natural se considera que el factor exergo económico a calcular debe ser menor o igual al calculado con el diésel.

$$\frac{\dot{Z}^{OM}}{\dot{Z}^{OM} + \dot{C}_d} \leq 0,73$$

Reemplazando los valores y despejando se tiene que el costo por mantenimiento y operación en unidad de tiempo es de:

$$\frac{\dot{Z}^{OM}}{\dot{Z}^{OM} + 3,53 \frac{USD}{h}} \leq 0,73$$

$$\dot{Z}^{OM} \leq 9,54 \frac{USD}{h}$$

---

Es decir que la suma de los costos de operación y mantenimiento debe ser menor o igual a 9 dólares con 54 centavos por hora.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la metodología de balances tanto para el diésel como para el gas natural permite evaluar los rendimientos que presenta cada uno de estos combustibles.

A continuación, en la tabla 10 se muestra los resultados obtenidos en el balance de masa que debido a la reacción química se realiza como balance molar.

**Tabla 10**

*Balance molar Diésel vs Gas natural*

Descripción	Flujo molar Diésel (kmol/h)	Flujo molar Gas natural (kmol/h)
Combustible	2,32	1,16
Aire	9,15	11,04
Gases	11,38	12,20

*Nota.* Elaborado a partir del balance molar del diésel y el gas natural, respectivamente.

Se puede observar que, aunque existe una mayor cantidad en moles de combustible diésel que ingresa respecto al gas natural, se produce más número de moles en los gases en el proceso de combustión de gas natural. Sin embargo, hay que considerar los productos de este proceso son dióxido de carbono y agua cuyos pesos moleculares son 44 kg/kmol y 18 kg/kmol, respectivamente. Mientras tanto, en el diésel adicional al proceso de combustión se produce dióxido de azufre cuyo peso molecular es 64 kg/kmol lo cual hace que haya mayor masa en los gases.

Respecto al balance de energía, en la tabla 11 se puede observar los valores obtenidos.

**Tabla 11**

*Balance de energía Diésel vs Gas natural*

Descripción	Flujo de calor Diésel (kJ/h)	Flujo de calor Gas natural (kJ/h)
Calor debido al acero	178050	178050
Calor debido al combustible	504340	265162
Pérdidas de calor	5711,7	5711,7
Calor debido a los gases	320510	81400,3

*Nota.* Elaborado a partir del balance de energía del diésel y el gas natural, respectivamente.

Aquí se puede observar que debido a la condición de que el proceso de calentamiento del acero debe ser el mismo con cualquiera de los combustibles, el flujo de calor absorbido por el acero y por pérdidas en el proceso tienen los mismos valores. Adicionalmente, se observa que el calor emitido por el combustible es mayor el del diésel comparado con el gas natural; sin embargo, el flujo de calor perdido con los gases es bastante alto con el diésel mientras que con el gas natural su valor es relativamente bajo.

Considerando el balance de entropía, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 12.

**Tabla 12**

*Balance de entropía Diésel vs Gas natural*

Descripción	Entropía Diésel (kJ/hK)	Entropía Gas natural (kJ/hK)
Cambio de entropía debido al acero	207,8	207,8

Entropía debido al combustible	1520,6	215,9
Entropía en pérdidas de calor	13,2	13,2
Entropía debido a los gases	1391,8	3398,1
Entropía generada en el sistema	92,2	3403,2

*Nota.* Elaborado a partir del balance de entropía del diésel y el gas natural, respectivamente.

Se puede observar que los valores de entropía debido al acero y por pérdidas son iguales, la razón es porque el proceso de calentamiento del acero debe ser el mismo en ambos casos tal como se explica en el análisis del balance de energía. Sin embargo, se marca una gran diferencia en la entropía del diésel con el gas natural mientras que al salir los gases sucede lo contrario. Es decir, hay más entropía por los gases de combustión del gas natural que por el diésel. Por supuesto, esto genera que haya más entropía generada en el proceso de combustión con gas natural.

En el caso del balance de exergía, a partir del último balance se obtiene los siguientes valores mostrados en la tabla 13.

**Tabla 13**

*Balance de exergía destruida Diésel vs Gas natural*

Descripción	Exergía Diésel (kJ/h)	Exergía Gas natural (kJ/h)
Exergía destruida en el sistema	26567,43	980632,08

*Nota.* Elaborado a partir del balance de exergía del diésel y el gas natural, respectivamente.

Indudablemente, la exergía usada en el proceso de gas natural es mucho mayor al proceso comparado. A simple vista, existe una gran cantidad de energía que se queda en el sistema para calentar el acero y obtener condiciones adecuadas.

Por último, los valores del balance termo económico se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14**

*Balance termo económico Diésel vs Gas natural*

Descripción	Diésel	Gas natural
Costo exergo económico unitario	$2,3 \cdot 10^{-4}$ USD/kJ	$3,6 \cdot 10^{-6}$ USD/kJ
Factor exergo económico	0,73	Menor o igual a 0,73
Flujo de costo por operación y mantenimiento	16,45 USD/h	Menor o igual a 9,54 USD/h

*Nota.* Elaborado a partir del balance termo económico del diésel y el gas natural, respectivamente.

Se puede observar que el proceso con gas natural tiene menor costo por unidad de energía consumida en dicho proceso. Cabe mencionar que el factor exergo económico se ha considerado que puede ser menor o igual al obtenido con el proceso de diésel, lo que provoca que el flujo de costo por operación y mantenimiento pueda ser menor o igual al valor descrito en la tabla.



## 8. CONCLUSIONES

El flujo de moles obtenido en el proceso de calentamiento de las platinas de acero de la zona de tratamiento térmico de la fábrica de resortes Vanderbilt con el combustible diésel es mayor respecto al proceso con el combustible gas natural, lo que indica que existe un mayor consumo en el primer proceso indicado en comparación con el segundo proceso.

Actualmente, la fábrica de resortes Vanderbilt tiene una alta cantidad de energía perdida en el proceso de temple debido a que es arrastrado por los gases productos de la combustión con el combustible utilizado, mientras que con el combustible propuesto -gas natural- se produce una pérdida energética de menor cantidad. Cabe indicar que, en ambos casos de combustible, esta energía perdida se puede aprovechar en otros procesos de necesidad energética.

En el balance entrópico, la entropía de diésel y sus productos de combustión tienen un valor alto y bajo, respectivamente, lo que produce que la exergía destruida relacionada con la entropía generada sea de un valor inferior, lo cual resulta en un proceso con baja energía útil. En comparación, al analizar el proceso con gas natural se encuentra que existe una alta energía útil debido al bajo y alto valor del combustible y sus productos de combustión, respectivamente.

El cambio de combustible de diésel a gas natural es una opción viable en el ámbito termo económico relacionado con los costos de operación y mantenimiento. El flujo de los costos de operación y mantenimiento del gas natural respecto al diésel pueden extenderse en el rango de 9,54 USD/h a 16,45 USD/h, lo que hace notar que no son elevados y que hay una amplia brecha a considerar para la implementación del combustible propuesto. Además, el costo por producir una unidad energía utilizada en el proceso de gas natural es muy bajo en comparación con el costo por la misma energía en un proceso con el diésel.

La realización del estudio termodinámico en el proceso de temple de la Fábrica de Resortes Vanderbilt presentó algunos inconvenientes en el momento de la obtención de datos respecto a las características de los combustibles, por lo que se sugiere que las fichas técnicas incluyan datos físicos y químicos tal como entalpía de formación, composición química, entre otros, para que los resultados obtenidos sean más apegados al proceso experimentado en la mencionada empresa. Aunque este inconveniente fue superado con la introducción de datos teóricos de fuentes bibliográficas es probable que exista un cierto grado de incertidumbre.

El ingreso manual de datos de ciertas propiedades como la entalpía y entropía resulta tedioso y difícil, por lo que se sugiere el uso de otros programas especializados con estos datos tal como Aspen Hysys que puede ser de adquisición por parte de la Fábrica de Resortes Vanderbilt en la realización de análisis futuros. En este sentido y considerando que existe una política nacional en un futuro cercano de implementar la eliminación de subsidios al diésel es fundamental la ejecución de funciones asociadas ya que, debido a la repetitividad con nuevos datos, los resultados pueden obtenerse rápidamente y sin mayor esfuerzo.

Algunos de los temas no abordados en este proyecto está la determinación experimental de la temperatura de reacción en el proceso de calentamiento de las placas de acero dentro del horno de temple. Además, debido a que en el presente estudio se considera que las reacciones químicas son completas, se recomienda que se aborde el tema de investigación bajo datos obtenidos mediante el análisis de Orsat y así poder confirmar si se cumple la consideración propuesta. Por último, se incita a realizar un estudio más exhaustivo, como objeto de estudio único, que involucre las variables económicas que puede tener el cambio de combustible, pues esto conlleva la compra de insumos para una adaptación del horno actual y que pueda usar gas natural o en su defecto la compra de un nuevo horno que funcione con gas natural.

## REFERENCIAS

- Ascanio, I. M., & Ariza Quiñonez, S. A. (2018). Diseño de sistema de control automatizado para horno de tratamientos térmicos de Aceros Cúcuta– Colombia. *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, 6(2), 27-32. <https://doi.org/10.15649/2346030X.482>
- Atarés Huerta, L. M. (2021). *Obtención del rendimiento de un motor de Carnot en función de las temperaturas de los focos térmicos*.
- Bencid, M., Delgado, J., Mora, D., & Austin, M. C. (2021). Inspección del uso de la exergía en el marco de la sostenibilidad: Un caso aplicado a la combustión interna. *I+D Tecnológico*, 17(1), Art. 1. <https://doi.org/10.33412/idt.v17.1.3026>
- Blanco, E. E. E., Pacheco, C. E. Á., & C, G. G. M. (2020). Modelamiento del tambor de una caldera acuotubular para una planta de energía térmica. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 1(35), Art. 35. <https://doi.org/10.24054/16927257.v35.n35.2020.49>
- Bohórquez, C. A. (2012). Influencia del Tratamiento Térmico desde Temperaturas Intercríticas en las Propiedades Mecánicas del Acero SAE 1045. *Mecánica Computacional*, 31(23), Art. 23.
- Bravo Gaete, M., Armstrong Cox, S., Bravo Gaete, M., & Armstrong Cox, S. (2019). Fin del universo y esperanza cristiana. *Veritas*, 42, 185-205. <https://doi.org/10.4067/S0718-92732019000100185>
- Cabrera Gómez, J., Palomino Marín, E., & Ferreras Cuevas, F. (2018). Evaluación de causas del sobreconsumo de combustible en horno de calentamiento de acero para laminación. *Ingeniería Mecánica*, 21(1), 45-51.
- Calvo, C. S. (2015). Hornos utilizados en la fabricación de aleaciones ferrosas y no ferrosas. *Scientia*, 17(17), Art. 17. <https://doi.org/10.31381/scientia.v17i17.388>
- Cedeño, L. (2018). *Fundamentos básicos de cálculos de ingeniería química con enfoque en alimentos*. (Primera). UTMACH.

- Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, M. (2019). *Termodinámica* (Novena). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.  
[https://www.academia.edu/45122402/Termodin%C3%A1mica\\_YUNUS\\_A\\_%C3%87ENGEL\\_Novena\\_edici%C3%B3n\\_Mc\\_Graw\\_Hill\\_](https://www.academia.edu/45122402/Termodin%C3%A1mica_YUNUS_A_%C3%87ENGEL_Novena_edici%C3%B3n_Mc_Graw_Hill_)
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and mass transfer: Fundamentals & applications* (Fifth edition). McGraw Hill Education.
- Chong, Z. R., Yang, S. H. B., Babu, P., Linga, P., & Li, X.-S. (2016). Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. *Applied Energy*, *162*, 1633-1652. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.061>
- CINAE. (2022, octubre). *Estadísticas – Cámara de la Industria Automotriz Ecuatoriana*.  
<https://www.cinae.org.ec/estadisticas/>
- Correía, J., Godoy, G., García, M., & Vega, R. (2015). Formulación de un fluido de perforación base diésel de bajo impacto ambiental. *Boletín de Geología*, *37*(2), Art. 2.  
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/4638>
- Doran, P. M. (2012). *Bioprocess Engineering Principles* (Second). Academic Press.
- Echeverry Garzón, R. D., Benavides Palacios, V. J., & Jiménez Forero, H. A. (2021). Efecto de la temperatura de revenido en las propiedades microestructurales, cristalográficas y resistencia al desgaste del acero ASI/SAE 1045: Effect of Tempering Temperature on Microstructural, Crystallographic and Wear Resistance Properties of ASI / SAE 1045 Steel. *Scientia et Technica*, *26*(2), Art. 2.  
<https://doi.org/10.22517/23447214.23731>
- Effatpanah, S. K., Ahmadi, M. H., Delbari, S. H., & Lorenzini, G. (2022). Energy, Exergy, Exergoeconomic and Emergy-Based Exergoeconomic (Emergoeconomic) Analyses of a Biomass Combustion Waste Heat Recovery Organic Rankine Cycle. *Entropy*, *24*(2), Art. 2. <https://doi.org/10.3390/e24020209>
- Escabedo, J. S. H., & Bocanegra, F. E. D. la R. (2016). Estudio Técnico y Económico de un sistema de Cogeneración en ciclo Hirn, para reemplazar al actual sistema Térmico Rankine en la empresa Corporación Pesquera Inca S.A.C. *Innovación en Ingeniería*, *2*(1), Art. 1.  
<https://revistas.ucv.edu.pe/index.php/innovacion/article/view/1741>

- Fierro, J. J., Escudero-Atehortua, A., Nieto-Londoño, C., Giraldo, M., Jouhara, H., & Wrobel, L. C. (2020). Evaluation of waste heat recovery technologies for the cement industry. *International Journal of Thermofluids*, 7-8, 100040.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100040>
- Garrido, S., Lalouf, A., & Thomas, H. (2012). *Políticas públicas para la inclusión social basadas en la producción de energías renovables. De las soluciones puntuales a los sistemas tecnológicos sociales*. 16, 8.
- Hernández-Mora, I. E., Lugo-Leyte, R., Bonilla-Blancas, A. E., López-Arenas, T., Salazar-Pereyra, M., & Lugo-Méndez, H. D. (2019). Exergoeconomic analysis of a compression refrigeration cycle considering the allocation cost of the residue formation process. *DYNA*, 86(208), 336-345.  
<https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.73299>
- Iglesias, F. J., Martínez, C., Cotes, M. T., Ruiz, J. M., García, L. E., & Corpas, F. (2014). Influencia de la atmósfera de sinterización en las propiedades mecánicas de los aceros P/M AISI 430L. *Revista de Metalurgia*, 50(1), Art. 1.  
<https://doi.org/10.3989/revmetalm.008>
- INEN. (2009). Gas natural. Requisitos. <https://www.normalizacion.gob.ec/>
- Jiménez, A. E. R., & Salazar, C. J. P. (2016). El proceso de sustitución de combustibles pesados por gas natural en el sector industrial del Valle del Cauca y del Cauca— Colombia 2004-2012. *Apuntes del Cenes*, 35(61), Art. 61.  
<https://doi.org/10.19053/22565779.4148>
- Jones, D. R. H., & Ashby, M. F. (2012). *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures and Processing*. Butterworth-Heinemann.
- Lehto, J., Oasmaa, A., Solantausta, Y., Kytö, M., & Chiaramonti, D. (2014). Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass. *Applied Energy*, 116, 178-190.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.040>
- Li, X.-S., Xu, C.-G., Zhang, Y., Ruan, X.-K., Li, G., & Wang, Y. (2016). Investigation into gas production from natural gas hydrate: A review. *Applied Energy*, 172, 286-322.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.101>
- López-Mata, F. A., Valencia-López, J. J., & Medina-Torres, L. (2016). Modelado de la Transferencia de Calor en el Tratamiento Térmico de Productos Enlatados.

*Información tecnológica*, 27(6), 85-94. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000600009>

Lozada, A. F. V., Suquillo, N. R. G., Lozada, A. F. V., & Suquillo, N. R. G. (2018). Análisis por el método de elementos finitos del comportamiento de las pastillas de freno ABS con base de acero y zinc al discretizar el elemento continuo al utilizar “software” CAE. *Enfoque UTE*, 9(1), 188-203.  
<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n1.259>

Mariños Rosado, D., Rojas Chávez, S., De los Santos Reyna, Y., & Chucuya Huallpachoque, R. (2016). Optimización del combustible por precalentamiento de la carga y enriquecimiento con oxígeno en los hornos de recalentamiento de la industria siderúrgica. *SCIÉND0*, 19(2), Art. 2.  
<https://doi.org/10.17268/sciendo.2016.005>

Marrugo Carreazo, D. E., Guerrero Gómez, G., & Gómez Camperos, J. A. (2015). Desarrollo de instrumento virtual enfocado en la adquisición de datos para generar perfiles de temperaturas en hornos. *Revista Ingenio*, 8(1), Art. 1.  
<https://doi.org/10.22463/2011642X.2047>

Martínez, J. M., Vargas, M., Arenas, A., & Gutiérrez, V. H. (2016). *Energía de activación para la difusión del boro durante la borurización de un acero de bajo carbono*. 3(7).

Martínez-Pérez, F. (2016). Procedimiento para la adecuada selección de aceros y de su tecnología de tratamiento térmico. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(2), 58-64.

Merino Casals, C. (2017). *Aceros inoxidables*. Dextra Editorial.  
<https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/ereader/bibliotecaups/139749>


Merino Casals, M. C. (2012). Diagramas y transformaciones de fase. 6. Solidificación. *REDUCA*, 4(3), Art. 3.  
<http://www.revistareduca.es/index.php/reduca/article/view/942>

Michaud, A. (2016). *Análisis de los procesos adiabáticos al nivel de las partículas elementales*. <https://doi.org/10.4172/2090-0902.1000177>

Michaud, A. (2021). On Adiabatic Processes at the Subatomic Level. *Newest Updates in Physical Science Research Vol. 4*, 4, 30-62.  
<https://doi.org/10.9734/bpi/nupsr/v4/1978F>

- Montes Martos, J. M., Cintas Físico, J., & Gómez Cuevas, F. P. (2014). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Paraninfo.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2019). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 9th Australia and New Zealand Edition* (9th ed.). John Wiley & Sons, Incorporated.  
<http://public.eblib.com/choice/PublicFullRecord.aspx?p=6488460>
- Patiño, H., & Rosero, B. (2016). *Tratamiento térmico de temple, influencia del medio de enfriamiento*. 8(1), 52-58.
- Peña, N., García, M., & Rigual, Y. (2020). Modelado Microestructural del Mecanismo de Ataque por Hidrógeno a Elevadas Temperaturas en el Acero C-½Mo mediante ensayos de simulación a escala de laboratorio. *Acta Microscopica*, 29(1), Art. 1.
- Pérez, W., Olaya, J. J., & Arenas, J. A. (2013). Influencia de las condiciones del tratamiento térmico sobre las propiedades mecánicas del acero 5160H. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 36(1), 23-31.
- Perry, R. H., Green, D. W., & Southard, M. Z. (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (Novena). McGraw-Hill Education.
- Rodríguez Baracaldo, R., Arroyo Osorio, J. M., & Parra Rodríguez, Y. (2016). Influencia del proceso de revenido en el comportamiento mecánico de un acero de fase dual de uso industrial automotriz. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 24(1), 94-101. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000100009>
- Salas-Banuet, G., Ramírez-Vieyra, J., Baena, O. J. R., Noguez-Amaya, M., & Cockrell, B. (2015). The importance of being chemical affinity. Part VI: The harvest. *DYNA*, 82(190), Art. 190. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n190.48730>
- Sandoval, D. L. G., & Avila, J. M. R. (2016). Análisis Exergético de Planta Piloto de Vapor para Generación de Energía Eléctrica. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 2(1), Art. 1.
- Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 697-701.  
<https://doi.org/10.1109/IEEM.2014.7058728>
- Soria Aguilar, Ma. de J., Reyes Guzman, F., Carrillo Pedroza, F. R., García Garza, F., Álvarez Jiménez, H., & Silva Guajardo, L. A. (2015). *Efecto del tratamiento*



- térmico sobre las propiedades mecánicas y microestructura de un acero para tubería API 5CT J55. XVI(4), 539-550. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.006>*
- Suárez Tamayo, S., & Molina Esquivel, E. (2014). El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 52(3), 357-363.
- Tao, D., Guang-liang, Y., Guang-ming, F., Chun-Ping, T., Zhao-Ming, M., Kal-lun, C., . . . Hong-li, C. (December de 2021). Heat transfer evaluation of natural convection outside the condenser in Passive Residual Heat Removal System of Molten Salt Reactor. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101611.  
[doi:10.1016/j.csite.2021.101611](https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101611)
- Tikadar, D., Gujarathi, A. M., & Guria, C. (2021, November). Safety, economics, environment and energy based criteria towards multi-objective optimization of natural gas sweetening process: An industrial case study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 95, 104207. [doi:10.1016/j.jngse.2021.104207](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104207)
- Trigo, S. (2019). *Entalpía y Entropía: Origen y aplicación*.
- Vanderbilt. (2022, marzo 29). *Resortes Vanderbilt—Elaboración y Distribución de Hojas y Resortes—* . Resortes Vanderbilt. <https://vanderbilt.com.ec/>
- Villa, G. I. M. (2022). Ingeniería Verde Aplicada, hacia la Evolución Sostenible de los Sistemas de Producción Industrial. *REICIT*, 2(1), Art. 1.
- Villalobos, J., Serna, S., Campillo, B., Flores, O., & López Martínez, E. (2016). Acero microaleado experimental sometido a tratamientos térmicos de revenido y su efecto sobre la fragilización por hidrógeno. *I+D Tecnológico*, 12(1), Art. 1.
- Villamar, C., Santos, R., Rondón, A., & Valera, Y. (2012). Modelado Energético y Exergético para el Estudio del Ciclo Brayton. *Ciencia e Ingeniería*, 33(3), 119-128.
- Xu, L., Cheng, J.-H., Liu, P., Wang, Q., Xu, Z.-X., Liu, Q., Shen, J.-Y., & Wang, L.-J. (2019). Production of bio-fuel oil from pyrolysis of plant acidified oil. *Renewable Energy*, 130, 910-919. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.012>
- Zaresharif, M., Vatani, A., & Ghasemian, M. (2022). Evaluation of Different Flare Gas Recovery Alternatives with Exergy and Exergoeconomic Analyses. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(5), 5501-5520.  
<https://doi.org/10.1007/s13369-021-05485-y>



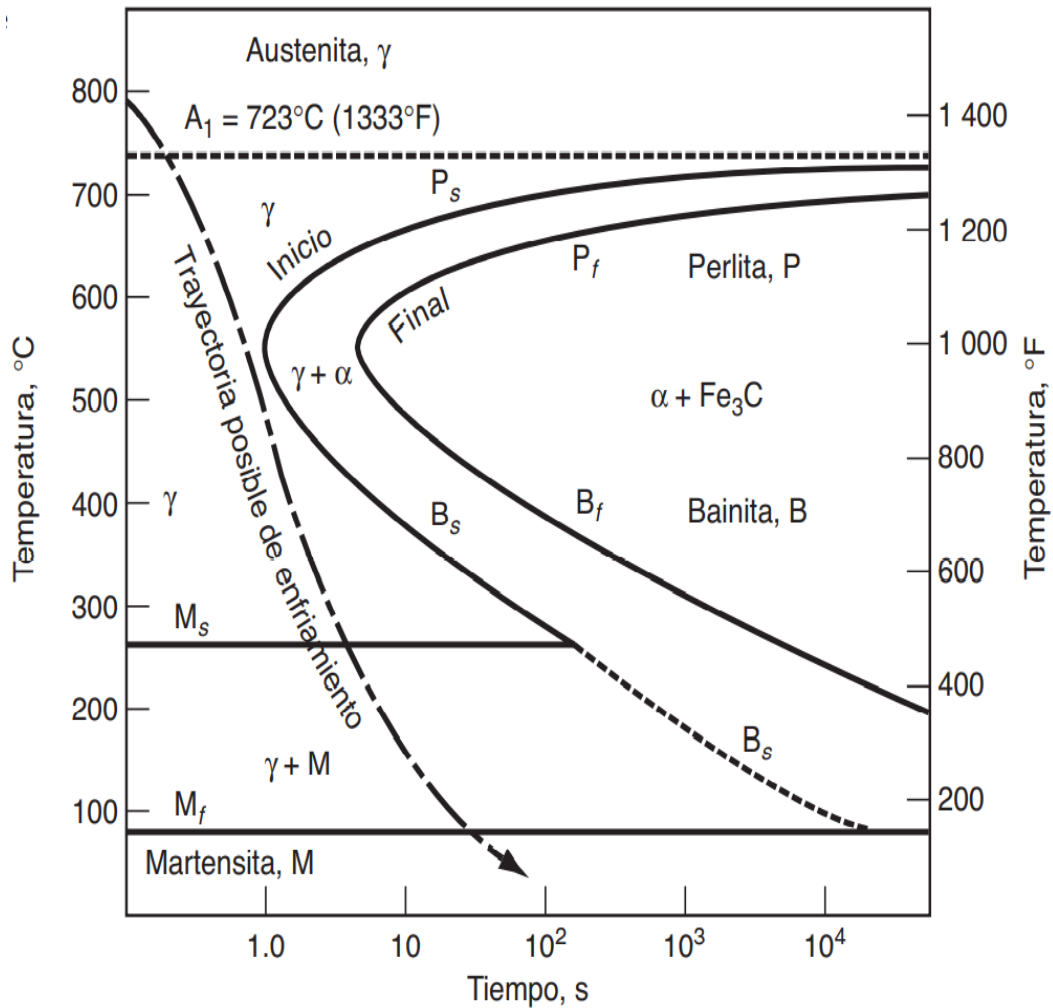
---

Zhang, L., Xue, Y., Xie, Q., & Ren, Z. (1 de March de 2021). Analysis and neural network prediction of combustion stability for industrial gases. *Fuel*, 287, 119507.  
doi:10.1016/j.fuel.2020.119507

# ANEXOS

## ANEXO 1

Diagrama Tiempo – Temperatura - Transformación del acero



*Nota.* La figura muestra los caminos posibles para un tratamiento térmico según lo indicado en el punto 5.2.1.1. El camino óptimo a seguir es el indicado por la flecha. Tomado de (Montes Martos et al., 2014).

**ANEXO 2**

*Programación en Matlab para cálculo de balances de masa, energía, entropía y exergía*

F: Flujo másico de combustible (kg/h)

P: Porcentaje del componente en el combustible

M: Peso molecular del componente en el combustible (kg/kmol)

```
function y = flujo_mol(F,P,M)
```

```
y = F * P / M;
```

```
end
```

```
function y = oxigeno_total(O1,O2,O3)
```

```
y = O1+O2+O3;
```

```
end
```

Exc: Tanto por uno de exceso de aire

OT: Flujos molar total de oxígeno (kmol/h)

OA: Porcentaje del oxígeno en el aire

```
function y = flujo_aire(Exc,OT,OA)
```

```
y = (1+Exc)*OT/OA;
```

```
end
```

```
function y = gases_total(g1,g2,g3,g4,g5)
```

```
y = g1+g2+g3+g4+g5;
```

```
end
```

F: Flujo másico de combustible (kg/h)

Pc: Poder calorífico del combustible (kcal/kg)

nc: Eficiencia de la combustión

```
function y = energia_comb(F,Pc,nc)
```

```
y = F * Pc * 4.184 * nc;
```

```
end
```

e: Emisividad

As: Area superficial (m<sup>2</sup>)

Ta: Temperatura del acero (°C)

To: Temperatura del ambiente (°C)

```
function y = energia_ac(e,As,Ta,To)
```

```
y = e * As * 0.000000567 * 3.6 * ((Ta+273.15)^4-(To+273.15)^4);
```

```
end
```

xr: Espesor de pared refractario (m)

kr: Conductividad térmica del refractario (J/ms°C)

Ar: Area plana media irradiada del refractario (m<sup>2</sup>)

xa: Espesor de pared aislante (m)

ka: Conductividad térmica del aislante (J/ms°C)

Aa: Area plana media irradiada del aislante (m<sup>2</sup>)

```
function y = resist(xr,kr,Ar,xa,ka,Aa)
```

```
y = 3.6 / ( xr/ (kr * Ar) + xa/ (ka * Aa));
```

```
end
```

Ti: Temperatura interior (K)

h1: Entalpía del oxígeno a la temperatura Ti (kJ/kmol)

h2: Entalpía del nitrógeno a la temperatura Ti (kJ/kmol)

h3: Entalpía del dióxido de carbono a la temperatura Ti (kJ/kmol)

h4: Entalpía del vapor de agua a la temperatura Ti (kJ/kmol)

h5: Entalpía del dióxido de azufre a la temperatura Ti (kJ/kmol)

```
function y = temperatura(Ti,h1,h2,h3,h4,h5)
```

```
y = 2.4771*Ti+1.8323*h1+7.2316*h2+0.8855*h3+1.4216*h4+0.0052*h5-1122000;
```

```
end
```

nf: Flujo molar del combustible (kmol/h)

sf: Entropía del combustible (kJ/kmolK)

```
function y = entropia_comb(nf,sf)
```

```
y = nf * sf;
```

```
end
```

e: Emisividad

As: Area superficial (m<sup>2</sup>)

Ta: Temperatura del acero (°C)

To: Temperatura del ambiente (°C)

```
function y = entropia_ac(e,As,Ta,To)
y = 4/3 * e * As * 0.0000000567 * 3.6 * ((Ta+273.15)^3-
(To+273.15)^3);
end
```

Ti: Temperatura interna del sistema (K)

Tp: Temperatura externa del sistema (K)

R: Resistencia al paso de calor (kJ/hK)

```
function y = entropia_perd(Ti,Tp,R)
y = R * (Ti-Tp)^2 / (Ti*Tp);
end
```

n: Flujo molar del componente (kmol/h)

x: fracción molar del componente

s: Entropía del componente a la temperatura absoluta (kJ/kmolK)

```
function y = entropia_gas(n,x,s)
y = n * (s-8.314*log(x));
end
```

c: Coeficiente del flujo molar del componente

hf: Entalpía de formación del componente (kJ/kmol)

h: Entalpía del componente a la temperatura absoluta (kJ/kmol)

ho: Entalpía del componente a la temperatura de referencia 25 °C (kJ/kmol)

```
function y = entalpia(c,hf,h,ho)
y = c * (hf + h - ho);
end
```

```
clear
clc
```

Flujo másico de combustible (kg/h)

F=12.3;

Flujos molares de especies en la alimentación (kmol/h)

FC=flujo\_mol(F,0.8647,12.011)

FC = 0.8855

FH=flujo\_mol(F,0.1165,1.008)

FH = 1.4216

```
FS=flujo_mol(F,0.0135,32.065)
```

```
FS = 0.0052
```

```
FO=flujo_mol(F,0.0027,15.999)
```

```
FO = 0.0021
```

```
FN=flujo_mol(F,0.0024,14.007)
```

```
FN = 0.0021
```

Flujo molar total de oxígeno (kmol/h)

```
OT=oxigeno_total(FC,0.5*FH,FS)
```

```
OT = 1.6015
```

Flujo molar de aire (kmol/h)

```
aire=flujo_aire(0.2,OT,0.21)
```

```
aire = 9.1513
```

Flujo molar de dióxido de carbono (kmol/h)

```
CO2=FC
```

```
CO2 = 0.8855
```

Flujo molar de agua (kmol/h)

```
H2O=FH
```

```
H2O = 1.4216
```

Flujo molar de dióxido de azufre (kmol/h)

```
S02=FS
```

```
S02 = 0.0052
```

Flujo molar de oxígeno saliente (kmol/h)

```
Os=0.2*aire+FO
```

```
Os = 1.8323
```

Flujo molar de nitrógeno saliente (kmol/h)

```
Ns=0.79*aire+FN
```

```
Ns = 7.2316
```

Flujo molar de gases (kmol/h)

```
gases=gases_total(CO2,H2O,S02,Os,Ns)
```

```
gases = 11.3762
```

```
clear
```

```
clc
```

Calor emitido por el combustible (kJ/h)

```
Qf = energia_comb(12.3,9800,1)
```

```
Qf = 5.0434e+05
```

Calor absorbido por el acero (kJ/h)

```
Qa = energia_ac(0.52,4*0.26,855,15)
```

```
Qa = 1.7805e+05
```

Resistencia en las pérdidas de calor (kJ/hK)

```
R=resist(0.286,0.76,0.66,0.257,0.15,1.94)
```

```
R = 2.4771
```

Intervalo de temperatura Ti

```
Thi=temperatura(2679,94055.7,89555.2,142323.3,118572.4,143605.4)
```

```
Thi = -61.6516
```

$T_{hs} = \text{temperatura}(2680, 94095, 89592, 142385, 118627, 143679)$

$T_{hs} = 411.5952$

Calor por pérdidas

$Q_p = R * (2679 - 373.15)$

$Q_p = 5.7117e+03$

Calor de gases

$G_p = 1.8323 * (94055.7 - 8682) + 7.2316 * (89555.2 - 8669) + 0.8855 * (142323.3 - 393520 - 9364) + 1.4216 * (118572.4 - 241820 - 9904) + 0.0052 * (143605.4 - 296320 - 9936)$

$G_p = 3.2051e+05$

clear

clc

Entropía por el combustible (kJ/hK)

$S_f = \text{entropia\_comb}(2.32, 655.425)$

$S_f = 1.5206e+03$

Entropía por el acero (kJ/hK)

$S_a = \text{entropia\_ac}(0.52, 4 * 0.26, 855, 15)$

$S_a = 207.8088$

Entropía en pérdidas de calor (kJ/hK)

$S_p = \text{entropia\_perd}(2679, 373.15, 2.4771)$

$S_p = 13.1750$

Entropía de cada componente gaseoso (kJ/hK)

$S_{O_s} = \text{entropia\_gas}(1.8323, 0.161, 279.911)$

$S_{O_s} = 540.7031$

$S_{N_s} = \text{entropia\_gas}(7.2316, 0.6357, 262.613)$

$S_{N_s} = 1.9263e+03$

$S_{CO_2} = \text{entropia\_gas}(0.8855, 0.0778, 327.065)$

$S_{CO_2} = 308.4159$

$S_{H_2O} = \text{entropia\_gas}(1.4216, 0.125, 280.033)$

$S_{H_2O} = 422.6722$

$S_{SO_2} = \text{entropia\_gas}(0.0052, 0.0005, 277.135)$

$S_{SO_2} = 1.7697$

$S_{O_i} = \text{entropia\_gas}(1.9215, 0.21, 204.013)$

$S_{O_i} = 416.9429$

$S_{N_i} = \text{entropia\_gas}(7.2285, 0.79, 190.491)$

$S_{N_i} = 1.3911e+03$

Entropía de los gases (kJ/hK)

$S_g = S_{O_s} + S_{N_s} + S_{CO_2} + S_{H_2O} + S_{SO_2} - S_{O_i} - S_{N_i}$

$S_g = 1.3918e+03$

clear

clc

Entalpía molar de cada componente saliente (kJ/kmolh)

HC02 = entalpia(1, -393520, 142323.3, 9364)

HC02 = -2.6056e+05

HH20 = entalpia(2, -241820, 118572.4, 9904)

HH20 = -2.6630e+05

HNs = entalpia(7.52, 0, 89555.2, 8669)

HNs = 6.0826e+05

Entalpía molar de cada componente aire (kJ/kmolh)

HO2 = entalpia(2, 0, 8384.4, 8682)

HO2 = -595.2000

HNi = entalpia(7.52, 0, 8373.8, 8669)

HNi = -2.2199e+03

Entalpía molar del gas natural (kJ/kmolh)

HGN = entalpia(1, -74850, 0, 0)

HGN = -74850

Entalpía molar de los gases (kJ/kmolh)

Hg = HC02 + HH20 + HNs

Hg = 8.1400e+04

Entalpía molar del aire (kJ/kmolh)

Ha = HO2 + HNi

Ha = -2.8151e+03

Balance entálpico en el proceso (kJ/kmolh)

Hbal = Hg - Ha - HGN

Hbal = 1.5907e+05

clear

clc

Entropía de cada componente saliente (kJ/hK)

SC02 = entropia\_gas(1.16, 0.095, 327.065)

SC02 = 402.0968

SH20 = entropia\_gas(2.32, 0.190, 280.033)

SH20 = 681.7095

SNs = entropia\_gas(8.72, 0.715, 262.613)

SNs = 2.3143e+03

Entropía de cada componente aire (kJ/hK)

S02 = entropia\_gas(2.32, 0.21, 204.013)

S02 = 503.4127

SNi = entropia\_gas(8.72, 0.79, 190.491)

SNi = 1.6782e+03

Entropía del gas natural (kJ/hK)

SGN = entropia\_gas(1.16, 1, 186.16)

SGN = 215.9456

Entropía de los gases (kJ/hK)

Sg = SC02 + SH20 + SNs

Sg = 3.3981e+03

Entropía del aire (kJ/hK)

Sa = S02 + SNi

Sa = 2.1816e+03



### ANEXO 3

*Propiedades térmicas de diferentes materiales relacionados al proceso de temple*

Material	Propiedad	Valor
Diésel	Poder calorífico (inferior)	$P_c = 9800 \frac{kcal}{kg}$
	Emisividad	$\varepsilon = 0,52$
	Área superficial (e=11mm, a=70mm, l=1600mm)	$A_s = 4 * 0,26 m^2$
Acero	Temperatura final del acero	$T_{acero} = 1128,15 K$
Ladrillo refractario	Conductividad térmica	$k_r = 2736 \frac{J}{mhK}$
	Espesor de pared	$x_r = 0,286 m$
	Área plana media irradiada	$A_r = 0,66 m^2$
Ladrillo aislante	Conductividad térmica	$k_a = 540 \frac{J}{mhK}$
	Espesor de pared	$x_a = 0,257 m$
	Área plana media irradiada	$A_a = 1,94 m^2$
	Temperatura de pared	$T_p = 373,15 K$

*Nota.* Adaptado de fichas técnicas de (Vanderbilt, 2022).

## ANEXO 4

*Flujo molar, Entalpía de formación y entalpía de referencia*

Sustancia	$\dot{n}_p \left( \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right)$	$\bar{h}_f^0 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right)$	$\bar{h}^0 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right)_{T=298,15 \text{ K}}$
Oxígeno O <sub>2</sub>	1,8323	0	8682
Nitrógeno N <sub>2</sub>	7,2316	0	8669
Dióxido de carbono CO <sub>2</sub>	0,8855	393520	9364
Vapor de agua H <sub>2</sub> O	1,4216	241820	9904
Dióxido de azufre SO <sub>2</sub>	0,0052	296320	9936

*Nota.* Adaptado de (Cengel et al., 2019).

## ANEXO 5

*Entalpía de formación y entropía absoluta a 25°C y 1 atm*

Sustancia	Fórmula	$\bar{h}_f^0$ (kJ/kmol)	$\bar{s}^0$ ( $\frac{kJ}{kmol * K}$ )
Acetileno	$C_2H_2$ (g)	+226730	200,85
Agua	$H_2O$ (l)	-285830	69,92
Alcohol etílico	$C_2H_5OH$ (g)	-235310	282,59
Alcohol etílico	$C_2H_5OH$ (l)	-277690	160,70
Alcohol metílico	$CH_3OH$ (g)	-200670	239,70
Alcohol metílico	$CH_3OH$ (l)	-238660	126,80
Amoníaco	$NH_3$ (g)	-46190	192,33
Benceno	$C_6H_6$ (g)	+82930	269,20
n-butano	$C_4H_{10}$ (g)	-126150	310,12
Carbón	$C$ (s)	0	5,74
Dióxido de carbono	$CO_2$ (g)	-393520	213,80
n-dodecano	$C_{12}H_{26}$ (g)	-291010	622,83
Etano	$C_2H_6$ (g)	-84680	229,49
Etileno	$C_2H_4$ (g)	+52280	219,83
Hidrógeno	$H_2$ (g)	0	130,68
Hidrógeno atómico	$H$ (g)	+218000	114,72
Metano	$CH_4$ (g)	-74850	186,16
Monóxido de carbono	$CO$ (g)	-110530	197,65
Nitrógeno	$N_2$ (g)	0	191,61
Nitrógeno atómico	$N$ (g)	+472650	153,30
Oxígeno	$O_2$ (g)	0	205,04
Oxígeno atómico	$O$ (g)	+249190	161,06
Propano	$C_3H_8$ (g)	-103850	269,91
Propileno	$C_3H_6$ (g)	+20410	266,94
Vapor de agua	$H_2O$ (g)	-241820	188,83

*Nota.* Adaptado de (Cengel et al., 2019).

## ANEXO 6

*Propiedades de gas ideal del oxígeno, O<sub>2</sub>*

$T (K)$	$\bar{h} \left( \frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$	$T (K)$	$\bar{h} \left( \frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$
0	0	0	460	13525	218,016
220	6404	196,171	470	13842	218,676
230	6694	197,461	480	14151	219,326
240	6984	198,696	490	14460	219,963
250	7275	199,885	500	14770	220,589
260	7566	201,027	510	15082	221,206
270	7858	202,128	520	15395	221,812
280	8150	203,191	530	15708	222,409
290	8443	204,218	540	16022	222,997
298	8682	205,033	550	16338	223,576
300	8736	205,213	560	16654	224,146
310	9030	206,177	570	16971	224,708
320	9325	207,112	580	17290	225,262
330	9620	208,020	590	17609	225,808
340	9916	208,904	600	17929	226,346
350	10213	209,765	610	18250	226,877
360	10511	210,604	620	18572	227,400
370	10809	211,423	630	18895	227,918
380	11109	212,222	640	19219	228,429
390	11409	213,002	650	19544	228,932
400	11711	213,765	660	19870	229,430
410	12012	214,510	670	20197	229,920
420	12314	215,241	680	20524	230,405
430	12618	215,955	690	20854	230,885
440	12923	216,656	700	21184	231,358
450	13228	217,342	710	21514	231,827

Propiedades de gas ideal del oxígeno, O<sub>2</sub> (continuación)

$T$ (K)	$\bar{h}$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right)$	$\bar{s}^0$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} * \text{K}}\right)$	$T$ (K)	$\bar{h}$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right)$	$\bar{s}^0$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} * \text{K}}\right)$
720	21845	232,291	980	30692	242,768
730	22177	232,748	990	31041	242,120
740	22510	233,201	1000	31389	243,471
750	22844	233,649	1020	32088	244,164
760	23178	234,091	1040	32789	244,844
770	23513	234,528	1060	33490	245,513
780	23850	234,960	1080	34194	246,171
790	24186	235,387	1100	34899	246,818
800	24523	235,810	1120	35606	247,454
810	24861	236,230	1140	36314	248,081
820	25199	236,644	1160	37023	248,698
830	25537	237,055	1180	37734	249,307
840	25877	237,462	1200	38447	249,906
850	26218	237,864	1220	39162	250,497
860	26559	238,264	1240	39877	251,079
870	26899	238,660	1260	40594	251,653
880	27242	239,051	1280	41312	252,219
890	27584	239,439	1300	42033	252,776
900	27928	239,823	1320	42753	253,325
910	28272	240,203	1340	43475	253,868
920	28616	240,580	1360	44198	254,404
930	28960	240,953	1380	44923	254,932
940	29306	241,323	1400	45648	255,454
950	29652	241,689	1420	46374	255,968
960	29999	242,052	1440	47102	256,475
970	30345	242,411	1460	47831	256,978

*Propiedades de gas ideal del oxígeno, O<sub>2</sub> (conclusión)*

$T (K)$	$\bar{h} \left( \frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$	$T (K)$	$\bar{h} \left( \frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$
1480	48561	257,474	1980	67127	268,275
1500	49292	257,965	2000	67881	268,655
1520	50024	258,450	2050	69772	269,588
1540	50756	258,928	2100	71668	270,504
1560	51490	259,402	2150	73573	271,399
1580	52224	259,870	2200	75484	272,278
1600	52961	260,333	2250	77397	273,136
1620	53696	260,791	2300	79316	273,891
1640	54434	261,242	2350	81243	274,809
1660	55172	261,690	2400	83174	275,625
1680	55912	262,132	2450	85112	276,424
1700	56652	262,571	2500	87057	277,207
1720	57394	263,005	2550	89004	277,979
1740	58136	263,435	2600	90956	278,738
1760	58880	263,861	2650	92916	279,485
1780	59624	264,283	2700	94881	280,219
1800	60371	264,701	2750	96852	280,942
1820	61118	265,113	2800	98826	281,654
1840	61866	265,521	2850	100808	282,357
1860	62616	265,925	2900	102793	283,048
1880	63365	266,326	2950	104785	283,728
1900	64116	266,722	3000	106780	284,399
1920	64868	267,115	3050	108778	285,060
1940	65620	267,505	3100	110784	285,713
1960	66374	267,891	3150	112795	286,355

*Nota.* Adaptado de (Cengel et al., 2019).

## ANEXO 7

Propiedades de gas ideal del nitrógeno,  $N_2$

$T$ (K)	$\bar{h}$ $\left(\frac{kJ}{kmol}\right)$	$\bar{s}^0$ $\left(\frac{kJ}{kmol * K}\right)$	$T$ (K)	$\bar{h}$ $\left(\frac{kJ}{kmol}\right)$	$\bar{s}^0$ $\left(\frac{kJ}{kmol * K}\right)$
0	0	0	460	13399	204,170
220	6391	182,639	470	13693	204,803
230	6683	183,938	480	13988	205,424
240	6975	185,180	490	14285	206,033
250	7266	186,370	500	14581	206,630
260	7558	187,514	510	14876	207,216
270	7849	188,614	520	15172	207,792
280	8141	189,673	530	15469	208,358
290	8432	190,695	540	15766	208,914
298	8669	191,502	550	16064	209,461
300	8723	191,682	560	16363	209,999
310	9014	192,638	570	16662	210,528
320	9306	193,562	580	16962	211,049
330	9597	194,459	590	17262	211,562
340	9888	195,328	600	17563	212,066
350	10180	196,173	610	17864	212,564
360	10471	196,995	620	18166	213,055
370	10763	197,794	630	18468	213,541
380	11055	198,572	640	18772	214,018
390	11347	199,331	650	19075	214,489
400	11640	200,071	660	19380	214,954
410	11932	200,794	670	19685	215,413
420	12225	201,499	680	19991	215,866
430	12518	202,189	690	20297	216,314
440	12811	202,863	700	20604	216,756
450	13105	203,523	710	20912	217,192

*Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N<sub>2</sub> (continuación)*

$T$ (K)	$\bar{h}$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right)$	$\bar{s}^0$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} * \text{K}}\right)$	$T$ (K)	$\bar{h}$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right)$	$\bar{s}^0$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} * \text{K}}\right)$
720	21220	217,624	980	29476	227,398
730	21529	218,059	990	29803	227,728
740	21839	218,472	1000	30129	228,057
750	22149	218,889	1020	30784	228,706
760	22460	219,301	1040	31442	229,344
770	22772	219,709	1060	32101	229,973
780	23085	220,113	1080	32762	230,591
790	23398	220,512	1100	33426	231,199
800	23714	220,907	1120	34092	231,799
810	24027	221,298	1140	34760	232,391
820	24342	221,684	1160	35430	232,973
830	24658	222,067	1180	36104	233,549
840	24974	222,447	1200	36777	234,115
850	25292	222,822	1220	37452	234,673
860	25610	223,194	1240	38129	235,223
870	25928	223,562	1260	38807	235,766
880	26248	223,927	1280	39488	236,302
890	26568	224,288	1300	40170	236,831
900	26890	224,647	1320	40853	237,353
910	27210	225,002	1340	41539	237,867
920	27532	225,353	1360	42227	238,376
930	27854	225,701	1380	42915	238,878
940	28178	226,047	1400	43605	239,375
950	28501	226,389	1420	44295	239,865
960	28826	226,728	1440	44988	240,350
970	29151	227,064	1460	45682	240,827



*Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N<sub>2</sub> (conclusión)*

$T (K)$	$\bar{h} \left( \frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$	$T (K)$	$\bar{h} \left( \frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$
1480	46377	241,301	1980	64090	251,607
1500	47073	241,768	2000	64810	251,969
1520	47771	242,228	2050	66612	252,858
1540	48470	242,685	2100	68417	253,726
1560	49168	243,137	2150	70226	254,578
1580	49869	243,585	2200	72040	255,412
1600	50571	244,028	2250	73856	256,227
1620	51275	244,464	2300	75676	257,027
1640	51980	244,896	2350	77496	257,810
1660	52686	245,324	2400	79320	258,580
1680	53393	245,747	2450	81149	259,332
1700	54099	245,166	2500	82981	260,073
1720	54807	246,580	2550	84814	260,799
1740	55516	246,990	2600	86650	261,512
1760	56227	247,396	2650	88488	262,213
1780	56938	247,798	2700	90328	262,902
1800	57651	248,195	2750	92171	263,577
1820	58363	248,589	2800	94014	264,241
1840	59075	248,979	2850	95859	264,895
1860	59790	249,365	2900	97705	265,538
1880	60504	249,748	2950	99556	266,170
1900	61220	250,128	3000	101407	266,793
1920	61936	250,502	3050	103260	267,404
1940	62654	250,874	3100	105115	268,007
1960	63381	251,242	3150	106972	268,601

*Nota.* Adaptado de (Cengel et al., 2019).

## ANEXO 8

*Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>*

$T (K)$	$\bar{h} \left( \frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$	$T (K)$	$\bar{h} \left( \frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$
0	0	0	460	15916	231,144
220	6601	202,966	470	16351	232,080
230	6938	204,464	480	16791	233,004
240	7280	205,920	490	17232	233,916
250	7627	207,337	500	17678	234,814
260	7979	208,717	510	18126	235,700
270	8335	210,062	520	18576	236,575
280	8697	211,376	530	19029	237,439
290	9063	212,660	540	19485	238,292
298	9364	213,685	550	19945	239,135
300	9431	213,915	560	20407	239,962
310	9807	215,146	570	20870	240,789
320	10186	216,351	580	21337	241,602
330	10570	217,534	590	21807	242,405
340	10959	218,694	600	22280	243,199
350	11351	219,831	610	22754	243,983
360	11748	220,948	620	23231	244,758
370	12148	222,044	630	23709	245,524
380	12552	223,122	640	24190	246,282
390	12960	224,182	650	24674	247,032
400	13372	225,225	660	25160	247,773
410	13787	226,250	670	25648	248,507
420	14206	227,258	680	26138	249,233
430	14628	228,252	690	26631	249,952
440	15054	229,230	700	27125	250,663
450	15483	230,194	710	27622	251,368

*Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO<sub>2</sub> (continuación)*

$T$ (K)	$\bar{h}$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right)$	$\bar{s}^0$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} * \text{K}}\right)$	$T$ (K)	$\bar{h}$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right)$	$\bar{s}^0$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} * \text{K}}\right)$
720	28121	252,065	980	41685	268,119
730	28622	252,755	990	42226	268,670
740	29124	253,439	1000	42769	269,215
750	29629	254,117	1020	43859	270,293
760	30135	254,787	1040	44953	271,354
770	30644	255,452	1060	46051	272,400
780	31154	256,110	1080	47153	273,430
790	31665	256,762	1100	48258	274,445
800	32179	257,408	1120	49369	275,444
810	32694	258,048	1140	50484	276,430
820	33212	258,682	1160	51602	277,403
830	33730	259,311	1180	52724	278,361
840	34251	259,934	1200	53848	297,307
850	34773	260,551	1220	54977	280,238
860	35296	261,164	1240	56108	281,158
870	35821	261,770	1260	57244	282,066
880	36347	262,371	1280	58381	282,962
890	36876	262,968	1300	59522	283,847
900	37405	263,559	1320	60666	284,722
910	37935	264,146	1340	61813	285,586
920	38467	264,728	1360	62963	286,439
930	39000	265,304	1380	64116	287,283
940	39535	265,877	1400	65271	288,106
950	40070	266,444	1420	66427	288,934
960	40607	267,007	1440	67586	289,743
970	41145	267,566	1460	68748	290,542

*Propiedades de gas ideal del dióxido de carbono, CO<sub>2</sub> (conclusión)*

$T (K)$	$\bar{h} \left( \frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$	$T (K)$	$\bar{h} \left( \frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$
1480	66911	291,333	1980	99606	308,604
1500	71078	292,114	2000	100804	309,210
1520	72246	292,888	2050	103835	310,701
1540	73417	292,654	2100	106864	312,160
1560	74590	294,411	2150	109898	313,589
1580	76767	295,161	2200	112939	314,988
1600	76944	295,901	2250	115984	316,356
1620	78123	296,632	2300	119035	317,695
1640	79303	297,356	2350	122091	319,011
1660	80486	298,072	2400	125152	320,302
1680	81670	298,781	2450	128219	321,566
1700	82856	299,482	2500	131290	322,808
1720	84043	300,177	2550	134368	324,026
1740	85231	300,863	2600	137449	325,222
1760	86420	301,543	2650	140533	326,396
1780	87612	302,217	2700	143620	327,549
1800	88806	302,884	2750	146713	328,684
1820	90000	303,544	2800	149808	329,800
1840	91196	304,198	2850	152908	330,896
1860	92394	304,845	2900	156009	331,975
1880	93593	305,487	2950	159117	333,037
1900	94793	306,122	3000	162226	334,084
1920	95995	306,751	3050	165341	335,114
1940	97197	307,374	3100	168456	336,126
1960	98401	307,992	3150	171576	337,124

*Nota.* Adaptado de (Cengel et al., 2019).

## ANEXO 9

*Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H<sub>2</sub>O*

$T$ (K)	$\bar{h}$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right)$	$\bar{s}^0$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} * \text{K}}\right)$	$T$ (K)	$\bar{h}$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right)$	$\bar{s}^0$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} * \text{K}}\right)$
0	0	0	460	15428	203,497
220	7295	178,576	470	15777	204,247
230	7628	180,054	480	16126	204,982
240	7961	181,471	490	16477	205,705
250	8294	182,831	500	16828	206,413
260	8627	184,139	510	17181	207,112
270	8961	185,399	520	17534	207,799
280	9296	186,616	530	17889	208,475
290	9631	187,791	540	18245	209,139
298	9904	188,720	550	18601	209,795
300	9966	188,928	560	18959	210,440
310	10302	190,030	570	19318	211,075
320	10639	191,098	580	19678	211,702
330	10976	192,136	590	20039	212,320
340	11314	193,144	600	20402	212,920
350	11652	194,125	610	20765	213,529
360	11992	195,081	620	21130	214,122
370	12331	196,012	630	21495	214,707
380	12672	196,920	640	21862	215,285
390	13014	197,807	650	22230	215,856
400	13356	198,673	660	22600	216,419
410	13699	199,521	670	22970	216,976
420	14043	200,350	680	23342	217,527
430	14388	201,160	690	23714	218,071
440	14734	201,955	700	24088	218,610
450	15080	202,734	710	24464	219,142

Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H<sub>2</sub>O (continuación)

$T$ (K)	$\bar{h}$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right)$	$\bar{s}^0$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} * \text{K}}\right)$	$T$ (K)	$\bar{h}$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right)$	$\bar{s}^0$ $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} * \text{K}}\right)$
720	24840	219,668	980	35061	231,767
730	25218	220,189	990	35472	232,184
740	25597	220,707	1000	35882	232,597
750	25977	221,215	1020	36709	233,415
760	26358	221,720	1040	37542	234,223
770	26741	222,221	1060	38380	235,020
780	27125	222,717	1080	39223	235,806
790	27510	223,207	1100	40071	236,584
800	27896	223,693	1120	40923	237,352
810	28284	224,174	1140	41780	238,110
820	28672	224,651	1160	42642	238,859
830	29062	225,123	1180	43509	239,600
840	29454	225,592	1200	44380	240,333
850	29846	226,057	1220	45256	241,057
860	30240	226,517	1240	46137	241,773
870	30635	226,973	1260	47022	242,482
880	31032	227,426	1280	47912	243,183
890	31429	227,875	1300	48807	243,877
900	31828	228,321	1320	49707	244,564
910	32228	228,763	1340	50612	245,243
920	32629	229,202	1360	51521	245,915
930	33032	229,637	1380	52434	246,582
940	33436	230,070	1400	53351	247,241
950	33841	230,499	1420	54273	247,895
960	34247	230,924	1440	55198	248,543
970	34653	231,347	1460	56128	249,185

*Propiedades de gas ideal del vapor de agua, H<sub>2</sub>O (conclusión)*

$T (K)$	$\bar{h} \left( \frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$	$T (K)$	$\bar{h} \left( \frac{kJ}{kmol} \right)$	$\bar{s}^0 \left( \frac{kJ}{kmol * K} \right)$
1480	57062	249,820	1980	81573	264,059
1500	57999	250,450	2000	82593	264,571
1520	58942	251,074	2050	85156	265,838
1540	59888	251,693	2100	87735	267,081
1560	60838	252,305	2150	90330	268,301
1580	61792	252,912	2200	92940	269,500
1600	62748	253,513	2250	95562	270,679
1620	63709	254,111	2300	98199	271,839
1640	64675	254,703	2350	100846	272,978
1660	65643	255,290	2400	103508	274,098
1680	66614	255,873	2450	106183	275,201
1700	67589	256,450	2500	108868	276,286
1720	68567	257,022	2550	111565	277,354
1740	69550	257,589	2600	114273	278,407
1760	70535	258,151	2650	116991	279,441
1780	71523	258,708	2700	119717	280,462
1800	72513	259,262	2750	122453	281,464
1820	73507	259,811	2800	125198	282,453
1840	74506	260,357	2850	127952	283,429
1860	75506	260,898	2900	130717	284,390
1880	76511	261,436	2950	133486	285,338
1900	77517	261,969	3000	136264	286,273
1920	78527	262,497	3050	139051	287,194
1940	79540	263,022	3100	141846	288,102
1960	80555	263,542	3150	144648	288,999

*Nota.* Adaptado de (Cengel et al., 2019).