



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA**

**Análisis exerético para una planta IGCC:  
Propuesta para una planta de RSU en la CDMX.**

**T E S I S**  
**Para obtener el título de:**  
**INGENIERO QUÍMICO**

**P R E S E N T A:**

**Rubén Ortega Pérez**

**DIRECTOR DE TESIS:**  
**Dr. Rodolfo Alberto Herrera Toledo**

**Ciudad de México, 2019.**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Tesis realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT TA101018

This work was supported by UNAM-PAPIIT TA101018

## **Agradecimientos**

A mi madre **Luisa Ortega Pérez** quien me ha apoyado incondicional e incansablemente en todas y cada una de las decisiones tomadas. Sin ella nada de esto sería posible. Gracias por tu amor y comprensión.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores “Zaragoza”**, por haberme brindado una formación académica superior de calidad, así como una formación deportiva incluso antes de ser matriculado en esta gloriosa institución.

A mi Director de Tesis, el **Dr. Rodolfo Alberto Herrera Toledo** por la paciencia, valioso apoyo y el tiempo dedicado a este trabajo, pero sobre todo por el conocimiento transmitido y la amistad brindada. Gracias por ser el ser humano que es.

A los profesores de la facultad que me brindaron palabras de aliento durante la carrera en especial a la **M. en I. María Estela de la Torre Gómez Tagle**.

A mis amigos y compañeros **Jessica Lizbeth Garro Chávez y Javier García Chávez** con quienes inicié este trabajo y me brindaron su apoyo hasta el final.

A los sinodales quienes enriquecieron este trabajo con sus comentarios.

## **Dedicatorias**

A mi madre, **Luisa Ortega Pérez.**

A mi segunda madre **Eva Ortega Olvera y José Ruíz.**

A mis tíos **Narcizo Ortega y Guadalupe Gutiérrez, Margarito Ortega y Ana Olvera.**

A mis hermanos **Carlos Ortega, Sandra Ortega, Eva Ruíz, María de la Luz Ruíz, Monserrat Ruano y Margarita Ruíz.**

A ellos y a todos los familiares, que me han ofrecido su apoyo y han estado para brindarme una palabra de aliento, les dedico este trabajo que representa el final de una de las etapas más importantes en la vida académica de un ser humano.

A mis amigos y compañeros **Alberto Tejeda, Paola Rincón, Zaira Llera, Michael Sierra, Jessica Garro y Javier García** con quienes compartí esta maravillosa experiencia universitaria.

A mis amigos **Ana Karen Romero, Axel Ordóñez, Leslie García y Fernanda Real** con quienes compartí increíbles momentos en la ENP No. 5 “José Vasconcelos” y cuya amistad atesoro invaluablemente.



<b>CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DEL SISTEMA.....</b>	<b>56</b>
<b>4.1 ISLA DE GASIFICACIÓN.....</b>	<b>56</b>
<i>Control y pretratamiento de los residuos.....</i>	<i>57</i>
<i>Reactor de gasificación.....</i>	<i>58</i>
<i>Capa de gasificación (gasification layer) 1.....</i>	<i>58</i>
<i>Cama móvil (moving bed) 2.....</i>	<i>61</i>
<i>Capa de relleno de coque (coke filling layer) 3.....</i>	<i>61</i>
<i>Salida de slag (slag outlet) 4.....</i>	<i>62</i>
<i>Free board 5.....</i>	<i>63</i>
<i>Gas de síntesis (Flammable gas).....</i>	<i>63</i>
<b>4.2 ISLA DE INTEGRACIÓN ENERGÉTICA.....</b>	<b>64</b>
<b>4.3 ISLA DE POTENCIA ELÉCTRICA.....</b>	<b>65</b>
<b>4.4 EVALUACIÓN DEL SISTEMA.....</b>	<b>67</b>
<i>Balance energético.....</i>	<i>71</i>
<i>Balance exergético.....</i>	<i>72</i>
<b>4.5 COGENERACIÓN.....</b>	<b>74</b>
<b>4.6 RESULTADOS.....</b>	<b>76</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>88</b>

## **Siglas y abreviaturas**

<b>°C</b>	<b>Grados Celsius</b>
<b>b, B</b>	<b>Exergía</b>
<b>Bd</b>	<b>Exergía destruida</b>
<b>CC</b>	<b>Cámara de combustión</b>
<b>CDMX</b>	<b>Ciudad de México</b>
<b>CENACE</b>	<b>Centro Nacional de Control de Energía</b>
<b>CFE</b>	<b>Comisión Federal de Electricidad</b>
<b>COVs</b>	<b>Compuestos Orgánicos Volátiles</b>
<b>Cp</b>	<b>Calor específico a presión constante</b>
<b>Cv</b>	<b>Calor específico a volumen constante</b>
<b>db</b>	<b>Base seca</b>
<b>DEA</b>	<b>Deareador</b>
<b>DOF</b>	<b>Diario Oficial de la Federación</b>
<b>E</b>	<b>Eenergía</b>
<b>FAO</b>	<b>Food and Agriculture Organization</b>
<b>GC</b>	<b>Compresor de gas</b>
<b>GE</b>	<b>Generador eléctrico</b>
<b>GEI</b>	<b>Gases de Efecto Invernadero</b>
<b>GT</b>	<b>Turbina de gas</b>
<b>h, H</b>	<b>Entalpía</b>
<b>HRSG</b>	<b>Heat Recovery Steam Generator</b>
<b>IGCC</b>	<b>Ciclo Combinado con Gasificación Integrada</b>
<b>in</b>	<b>Entrada</b>
<b>K</b>	<b>Grados Kelvin</b>
<b>Kg</b>	<b>Kilogramos</b>
<b>kPa</b>	<b>Kilopascales</b>
<b>kW</b>	<b>Kilowatts</b>

<b>kWh</b>	<b>Kilowatt-hora</b>
<b>LIE</b>	<b>Ley de la industria eléctrica</b>
<b>MW</b>	<b>Megawatts</b>
<b>out</b>	<b>Salida</b>
<b>P</b>	<b>Presión</b>
<b>PJ</b>	<b>Petajoules</b>
<b>Q</b>	<b>Calor</b>
<b>RSU</b>	<b>Residuos Sólidos Urbanos</b>
<b>s, S</b>	<b>Entropía</b>
<b>SAO</b>	<b>Sustancias Agotadoras del Ozono</b>
<b>SEDEMA</b>	<b>Secretaría de Medio Ambiente</b>
<b>SEMARNAT</b>	<b>Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales</b>
<b>SENER</b>	<b>Secretaría de Energía</b>
<b>ST</b>	<b>Turbina de vapor</b>
<b>T</b>	<b>Temperatura</b>
<b>TD</b>	<b>Tarifas Domésticas</b>
<b>TDAC</b>	<b>Tarifas de Alto Consumo</b>
<b>ton</b>	<b>Toneladas</b>
<b>U</b>	<b>Energía interna</b>
<b>V</b>	<b>Volumen</b>
<b>W</b>	<b>Trabajo</b>
<b><math>\eta</math></b>	<b>Eficiencia</b>

### Otros

<b>Punto</b>	<b>Tasa de cambio</b>	$\dot{W}, \dot{Q}, \dot{S}, \dots$
<b>Minúscula</b>	<b>Específica</b>	s, b, h
<b>Mayúscula</b>	<b>Total</b>	S, B, H

## **Resumen**

Uno de los retos más importantes en la Ciudad de México (CDMX) es proteger y restaurar el medio ambiente. La generación y el incorrecto manejo de los residuos sólidos producen impactos negativos de manera particular sobre agua, aire, suelo, flora y fauna, además del deterioro a los ecosistemas.

Los métodos actuales de tratamiento de residuos incluyen rellenos sanitarios, compostaje, digestión anaerobia, incineración, pirólisis y gasificación (estos últimos han sido usados a menudo en naciones industrializadas con sistemas de recuperación de energía térmica).

En la Ciudad de México se generan alrededor de 12, 998 ton/día de residuos sólidos urbanos (RSU). Los rellenos sanitarios locales han alcanzado su capacidad límite y su cierre es inminente. Las plantas de Ciclo Combinado con Gasificación Integrada (IGCC) han demostrado ser una opción para reducir el volumen de estos desechos.

Se propone emplear los residuos sólidos urbanos como materia prima para la generación de energía eléctrica en una planta de Ciclo Combinado con Gasificación Integrada, para responder a las problemáticas ya mencionadas y contribuir a mejorar la calidad de vida de los habitantes de esta ciudad, con el siguiente objetivo general:

Analizar exergéticamente un sistema IGCC para generación de potencia eléctrica y energía térmica a partir de residuos sólidos urbanos.

De esta forma se minimizan el uso de recursos naturales y emisiones de desperdicios y contaminantes a la atmósfera, de tal manera que se origina una forma responsable de disminuir riesgos ambientales y de salud de futuras generaciones.

La planta IGCC está compuesta por tres islas: isla de gasificación y fusión directa, isla de generación de energía e isla de calentamiento. Se ha calculado que es posible recuperar 3.35 kg/s de syngas a partir de 1,600 ton/día de residuos sólidos urbanos recibidos de una de las plantas de compactación de residuos más grandes de esta ciudad dentro de "La central de Abasto". Además, al cuantificar el calor producido en el sistema de gasificación y el calor útil del sistema, ambos de

diferentes calidades, se propone utilizarlos en el almacenamiento refrigerado y congelado en pesquerías y carnicerías en "La Central de Abasto".

En este trabajo se realizaron análisis exergéticos de dos configuraciones diferentes de una planta de Ciclo Combinado de Gasificación Integrada (IGCC), teniendo en cuenta los cambios en la legislación energética actual, permitiéndonos obtener tres indicadores de conversión de vital importancia para el análisis de viabilidad económica posterior.

## **Introducción**

La Ciudad de México genera alrededor de 12, 998 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos, cantidad que no sólo se atribuye a su población residente, sino también a la población flotante que diariamente ingresa a la entidad a realizar sus actividades. (SEDEMA, Inventario de Residuos Sólidos Urbanos, CDMX 2017, 2018).

La CDMX dispone de la siguiente infraestructura para el manejo de los residuos sólidos: 12 estaciones de Transferencia, 2 plantas de Selección, 2 plantas Compactadoras, 8 plantas de Composta y 5 sitios de Disposición Final. (SEDEMA, Inventario de Residuos Sólidos Urbanos, CDMX 2017, 2018).

Las dos plantas compactadoras se ubican en la Fase I y Fase II de la planta de selección de San Juan de Aragón. (SEDEMA, Inventario de Residuos Sólidos Urbanos, CDMX 2017, 2018).

Desde el cierre definitivo de la Cuarta Etapa del relleno sanitario Bordo Poniente, la Ciudad de México ha generado acuerdos con el Estado de México y Morelos para disponer sus residuos en rellenos sanitarios autorizados; cuatro de ellos se ubican en el Estado de México (Chicoloapan, Cuautitlán, Milagro y Cañada) y uno en Cuautla, Morelos. (SEDEMA, Inventario de Residuos Sólidos Urbanos, CDMX 2017, 2018).

Por tal motivo esta tesis propone aprovechar y disponer de mejor manera los residuos de la Ciudad de México, específicamente los recolectados en la Central de Abasto de la Ciudad de México, utilizándolos como materia prima para la generación de potencia eléctrica.

Países como Alemania, Noruega y Japón han adoptado la incineración y gasificación de sus residuos como métodos de tratamiento debido a que las legislaciones cada vez son más estrictas con respecto a la disposición de estos.

La viabilidad de la incineración depende de muchos factores, entre ellos el diseño, el control del proceso, la capacidad, eficacia y eficiencia de los dispositivos de control de emisiones de compuestos contaminantes como dioxinas y furanos. Un uso inapropiado de los incineradores puede dar lugar a la formación de subproductos transportados por el aire y sólidos peligrosos que representan una grave amenaza para el medio ambiente y la salud pública. Estos subproductos son a menudo más tóxicos que el material que ha sido incinerado (FAO, 1996).

La aplicación de tecnologías para gasificación, como el plasma, puede evitar la formación de estos compuestos. La tecnología de plasma se ha expuesto como una tecnología limpia, con potencial para generar energía eléctrica y otros productos derivados tales como baldosas arquitectónicas y ladrillos para construcción.

Algunos de los beneficios de utilizar la tecnología de plasma son: que los componentes inorgánicos en los residuos se derriten y vitrifican en un residuo sólido, como roca, que es altamente resistente a la lixiviación y que los materiales orgánicos y polímeros son convertidos en gas de síntesis (syngas). El gas y los subproductos sólidos son potencialmente reciclables como gases combustibles útiles y grava para caminos (Bodorow et al., 2005).

Aunque esta tecnología es costosa, con el método tradicional de disposición de residuos sólidos (rellenos sanitarios o vertederos), los residuos son enterrados y generan gases de efecto invernadero, en su mayoría metano, por tanto, los materiales que los componen no son aprovechados. Por el contrario, con el tratamiento por plasma estos materiales se disocian en sus elementos básicos y pueden ser aprovechados en otros procesos productivos.

Si bien la tecnología ya existe, debe realizarse un análisis termodinámico con las condiciones a las que un sistema de estas características operaría en la Ciudad de México, es entonces cuando la herramienta conocida como “análisis exergético” (segunda ley de la termodinámica) nos permitirá saber si este proceso es energéticamente factible.

Los objetivos particulares de este trabajo son los siguientes:

- 1 Determinar la cantidad de syngas que se puede producir a partir de los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México.
- 2 Determinar la cantidad de potencia eléctrica producida en un ciclo Brayton a partir del syngas.
- 3 Determinar la cantidad de potencia eléctrica producida en un ciclo Rankine a partir del calor disponible de los gases de combustión emitidos por el ciclo Brayton.
- 4 Analizar el caso base y la segunda propuesta que contemple utilizar el calor rechazado por el condensador del ciclo Rankine del caso base.

# Capítulo 1

## La industria eléctrica en México.

El uso de la energía es probablemente el más simple y confiable indicador de nivel de desarrollo de tecnología.

La energía eléctrica se obtiene mediante el movimiento de cargas eléctricas que se produce en el interior de materiales conductores como el cobre. La electricidad se caracteriza por su limpieza, seguridad y versatilidad, de ahí su alta demanda a nivel mundial.

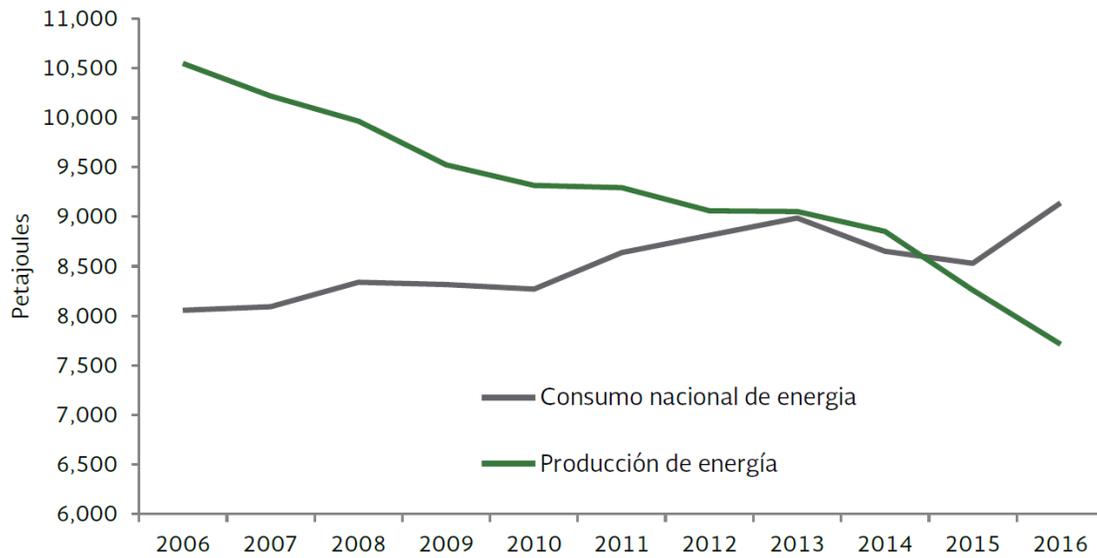
### 1.1 Situación actual del país

Es imposible imaginar al mundo sin electricidad hoy en día. Desde el momento en el que nos levantamos, nuestras vidas son una cadena incesante de eventos relacionados con la electricidad: la secadora de cabello, las noticias por la radio, el horno de microondas calentando el desayuno, la computadora, el teléfono; si llega a faltar el agua, la bomba automáticamente la sube al tinaco.

La energía eléctrica es de suma importancia en el sistema de transporte público como el metro y los trolebuses. Por otra parte, el uso de la electricidad en los distintos procesos industriales ha provocado cambios significativos en los últimos años. Con algunas excepciones, esta forma de energía se utiliza en iluminación y alimentación de motores, arcos para fundición, robots para el ensamblado de piezas automotrices, etc.

Debido a la importancia de la energía eléctrica, es alarmante que, en 2015, el consumo de energía en México superó, por primera vez, a la producción de energía primaria con 3.2% de diferencia y para 2016 el consumo superó a la producción con 18.5%, el reflejo de este comportamiento es visible en el aumento de 7.2% del consumo y la caída de 6.6% en la producción respecto al 2015, ver Figura 1. (SENER, 2018).

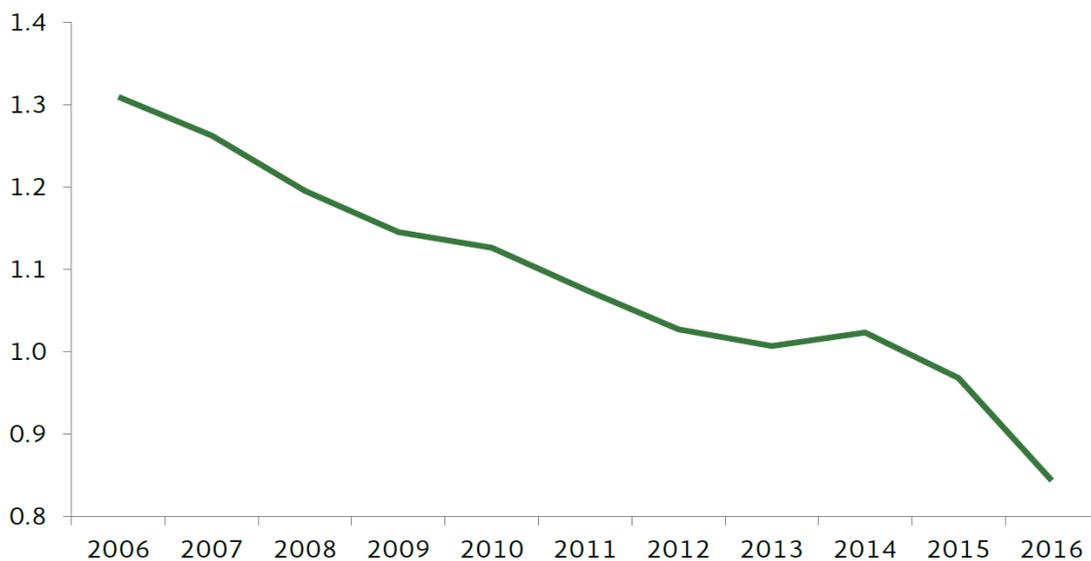
*Figura 1 Evolución de la producción y el consumo nacional de energía*



Fuente: Sistema de Información Energética. SENER, 2018.

En 2016, México presentó un índice de independencia energética, que muestra la relación entre la producción y el consumo nacional de energía, de 0.84, ver Figura 2. Es decir, se produjo 15.6% menos energía de la que se puso a disposición de las diversas actividades de consumo en el territorio nacional. (SENER, 2018).

*Figura 2 Índice de dependencia energética*



Fuente: Sistema de Información Energética, SENER, 2018.

Este índice es utilizado a nivel internacional para medir, de forma general, el grado en que un país puede cubrir su consumo de energía derivado de su producción; si es mayor a uno el país se considera independiente energéticamente. El 2016 es el segundo año consecutivo en que este índice se encontró por debajo de 1, lo que indica la dependencia del país de las importaciones de energía para satisfacer la demanda y, como se observa, la tendencia es a la baja. (SENER, 2018)

En 2016, la producción nacional de energía primaria totalizó en 7,714.23 PJ, 6.6% menor respecto al año 2015, ver Tabla 1.1 y Figura 3, (SENER, 2018).

*Tabla 1 Producción de energía primaria (Petajoules).*

	2015	2016	Variación porcentual (%) 2015/2014	Estructura porcentual (%) 2015
Total	8,261.03	7,714.23	-6.62	100
Carbón	287.69	254.17	-11.65	3.29
Hidrocarburos	7,203.85	6,694.85	-7.07	86.79
Petróleo crudo	5,067.69	4,826.85	-4.75	62.57
Condensados	98.83	88.31	-10.64	1.14
Gas natural	2,037.32	1,779.68	-12.65	23.07
Nucleoenergía	120.41	109.95	-8.68	1.43
Renovables	649.09	655.26	0.95	8.49
Hidroenergía	111.21	110.51	-0.63	1.43
Geoenergía	134.53	132.59	-1.44	1.72
Solar	10.15	11.19	10.18	0.15
Energía eólica	31.48	37.36	18.67	0.48
Biogás	1.87	1.91	2.38	0.02
Biomasa	359.84	361.70	0.51	4.69
Bagazo de caña	107.00	110.14	2.93	1.43
Leña	252.84	251.56	-0.51	3.26

Fuente: Sistema de Información Energética, SENER, 2018.

Debido al déficit que presenta el país en la producción de energía primaria, es necesario hacer una revisión de los principales energéticos utilizados para este propósito, con el fin de hacer notar la urgencia con la que se requiere aumentar el uso de alternativas energéticas.

La producción de los energéticos fósiles como el petróleo, el gas natural y condensados presentó caídas de 4.8%, 12.7% y 10.6% respectivamente. El gas que se envía a la atmósfera

aumentó 18% con respecto al 2015, mientras que el aprovechamiento del gas natural disminuyó 2.0% (SENER, 2018).

Asimismo, la producción de carbón mineral en 2016 totalizó en 254.17 PJ, 11.7% por debajo del 2015. El 71.3% de esta cifra correspondió a la producción de carbón no coquizable, mientras que el 28% restante recayó en el carbón coquizable.

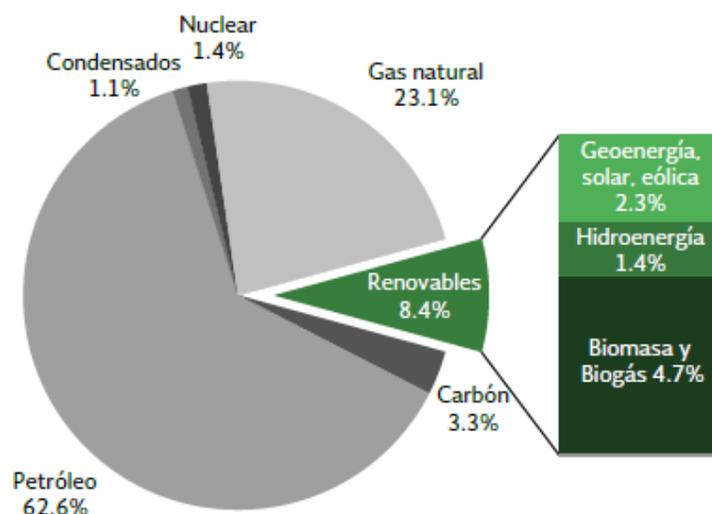
La producción de energía nuclear disminuyó 8.7%, pasando de 120.41 PJ en 2015 a 109.95 PJ en el 2016 (SENER, 2018).

Debido a la disminución de las aportaciones pluviales y a la reducción en el uso de agua para la generación de electricidad en las centrales públicas a cargo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la generación de hidroenergía disminuyó 0.6%, con un total de 110.51 PJ (SENER, 2018).

La geoenergía totalizó 132.59 PJ, provocando una baja de 1.4% respecto a 2015 mientras que en lo referente a la energía eólica se registró una producción de 37.36 PJ (SENER, 2018).

La producción de biogás mostró incremento del 2.4%, dando un total de 1.91 PJ. Por su parte, la biomasa, que se integra por bagazo de caña (30.5%) y leña (69.5%), pasó de 359.84 PJ en 2015 a 361.70 PJ en 2016, incrementando 0.51% (SENER, 2018).

*Figura 3 Estructura de la producción de energía primaria, 2016 (Petajoules).*



Fuente: Sistema de Información Energética, SENER, 2018.

La utilización de los residuos sólidos urbanos como fuente energética busca incrementar el porcentaje de energía primaria renovable. La estructura de la producción de energía primaria se vería modificada debido a la producción de syngas durante el tratamiento termoquímico de los residuos sólidos urbanos. El gas producido por esta planta es alimentado a una turbina de gas para la generación de energía eléctrica, aunque no es el único producto (primario) que pudiera obtenerse, ya que una planta de este tipo es capaz de suministrar vapor y calor como servicios, ver Figura 4.

*Figura 4 Esquema de la materia prima y productos que se pueden obtener.*



Fuente: Elaboración propia

En esta tesis se han propuesto y analizado ambos arreglos de la planta. El primero, en el que todo el vapor disponible se destina a la generación de vapor, mediante un HRSG (Heat-Recovery-Steam-Generator), para la alimentación de la turbina de vapor y el segundo, en el que el calor disponible se destina a un sistema de refrigeración por absorción.

Cabe mencionar que la principal diferencia entre gas de síntesis (syngas) y biogás radica en que el primero se obtiene mediante un proceso termoquímico mientras que el otro se obtiene por un proceso bioquímico.

## **1.2 Reforma energética.**

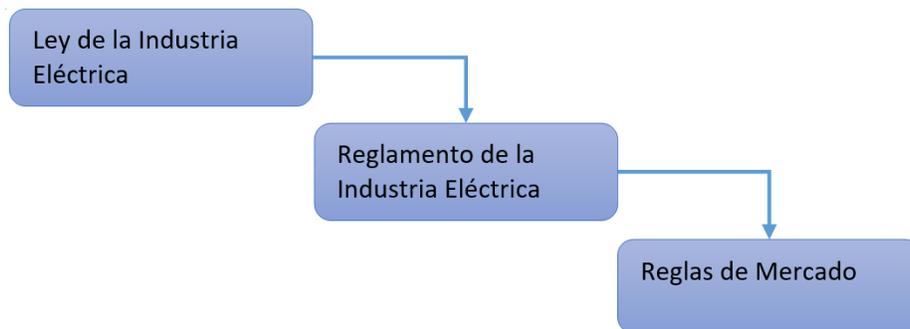
La Reforma Energética, aprobada en 2013, ha abierto la oportunidad a empresas privadas para que puedan participar libremente en la generación y comercialización de electricidad, mientras que se mantiene el control y operación de la red eléctrica por parte del Centro Nacional de Control de la Energía. Esto permite ofrecer un mejor servicio a los usuarios debido a que la competitividad entre las empresas productoras de energía resultará en precios más accesibles.

El 11 de agosto de 2014 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la Ley de la Industria Eléctrica que tiene como finalidad:

- Incrementar la competitividad en el suministro de energía.
- Promover el desarrollo sustentable de la Industria eléctrica.
- Garantizar su operación continua, eficiente y segura en beneficio de los usuarios.
- Asegurarse del cumplimiento de las obligaciones de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes.

La implementación de la Reforma Energética ha establecido como derivado un nuevo marco regulatorio para el sector eléctrico, que de forma jerárquica queda como se muestra en la Figura 5.

*Figura 5 Jerarquía del marco regulatorio del sector eléctrico.*



Fuente: SUMEX, 2017.

### Ley de la Industria Eléctrica

El plan nacional de desarrollo 2030 contempla que para este año México tendrá una población de 137.5 millones de personas, que, en su momento, tendrá un consumo bruto eléctrico de 445,301.8 GWh. así como la inclusión de energías renovables en la generación eléctrica nacional para satisfacer esta demanda (LEY DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA, 2014).

El uso de los residuos sólidos urbanos como materia prima para la generación de electricidad minimiza el uso de recursos naturales y emisiones de desperdicios y contaminantes. Particularmente, el sistema propuesto para este trabajo, compuesto principalmente de tres islas (de gasificación, ciclo Brayton y ciclo Rankine, de las que se hablará más adelante) tiene

emisiones de hidrógeno, monóxido de carbono, bióxido de carbono y nitrógeno por debajo de los permitidos por la normatividad vigente<sup>1</sup>.

Es así como la energía producida por esta planta se acredita como energía limpia, de acuerdo a la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) que define a ésta como: *aquella fuente de energía y procesos de generación de electricidad cuyas emisiones o residuos, cuando los haya, no rebasen los umbrales establecidos en las disposiciones reglamentadas que para tal efecto se expidan.*

Probando apegarse a la ya mencionada ley, que en su Capítulo 1, Artículo 1 establece que se tiene como objeto regular la planeación y el control del Sistema Eléctrico Nacional, el Servicio Público de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica y las demás actividades de la industria eléctrica.

Esta ley también tiene como finalidad promover el desarrollo sustentable de la industria eléctrica y garantizar su operación continua, eficiente y segura en beneficio de los usuarios, así como el cumplimiento de las obligaciones de servicio público y universal, de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes.

Aparte de la inversión de 5,626 millones de dólares que CFE ha estado realizando desde 2015 al 2019 para el mejoramiento y la expansión de su capacidad de generación de electricidad, ha firmado 27 contratos con inversionistas, con la denominación “productos independientes” (categoría en la que la planta aquí propuesta podría ser clasificada), por 25 años, con plantas particulares de ciclos combinados (Milenio, 2016).

### Ley de transición eléctrica

Esta ley, complementaria de la Ley de la Industria Eléctrica, publicada el 24 de diciembre de 2015 y que entró en vigor en enero de 2018, busca fomentar el cuidado del medio ambiente al cambiar la generación de fuentes fósiles a limpias. Esta ley establece metas y obligaciones para las áreas de energías limpias y la eficiencia energética. Las metas establecidas con respecto al porcentaje de energías limpias en la generación eléctrica son: 25% en 2018, 30% en 2021 y 35% para 2024.

---

<sup>1</sup> NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.

El cambio en el uso de fuentes energéticas fósiles a limpias permitirá que poco a poco se amplíe la matriz energética con nuevas fuentes que al día de hoy el país no tiene.

Además, se ha planteado en la LIE el reto de reducir la emisión de contaminantes hasta en un 25 % para 2030. Esto significa pasar de 3.9 a 2.9 toneladas de emisiones per cápita de dióxido de carbono.

Es por lo anterior que la ley tiene por objetivo “[...] regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de energías limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la industria eléctrica [...]”. Solo se habla de la industria eléctrica por la siguiente razón: las energías limpias se refieren a energéticos y tecnologías que se utilizan para satisfacer la demanda energética de los usuarios y que no emitan o emiten cantidades muy bajas de gases de efecto invernadero (GEI) (Comercio Exterior, 2018).

### 1.3 Tarifas eléctricas

En México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que es la empresa productiva del Estado encargada de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica y otros particulares, cobran el consumo de energía eléctrica por kWh. La energía se calcula acumulando la potencia que se consume en un periodo de tiempo.

#### Tarifas domesticas

La CFE maneja ocho tipos diferentes de tarifas residenciales categorizadas en Tarifas Domésticas y Tarifas Domésticas de Alto Consumo (TDAC) como se puede ver en la Tabla 2.

Las tarifas domésticas son asignadas de acuerdo a las condiciones climáticas de la región donde se encuentre el cliente, más específicamente la temperatura media mínima en verano.

*Tabla 2 Tarifas domésticas.*

Esquema tarifario (diciembre 2017-2018)							
Domésticas	1	1A	1B	1C	1D	1E	1F
Domésticas de alto consumo	DAC						

Fuente: Comisión Federal de Electricidad

Así la tarifa 1 se aplica a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, para cargas que no sean consideradas de alto consumo de acuerdo a lo establecido en

la Tarifa DAC, conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda. Este servicio sólo se suministrará en baja tensión.

Por tanto, la tarifa 1A se asignará a localidades con temperatura media mínima en verano de 25 °C y las temperaturas medias para las tarifas 1B-1F se muestran en la Tabla 3.

*Tabla 3 Temperatura media asociada a la tarifa.*

Tarifa	Temperatura media mínima (°C)
1A	25
1B	28
1C	30
1D	31
1E	32
1F	>33

Fuente: Elaboración propia con datos de Comisión Federal de Electricidad, 2017.

Se considera que un servicio es de alto consumo cuando registra un consumo mensual promedio mayor al límite superior de consumo definido para su localidad.

#### Tarifas específicas.

El producto final de la planta de IGCC, energía eléctrica, no está destinado al mercado del consumo doméstico sino a su utilización en el mercado industrial y servicios públicos (iluminación). Las tarifas que CFE maneja de acuerdo a las demandas energéticas del cliente para el mercado industrial se muestran en la Tabla 4.

*Tabla 4 Tarifas específicas de estímulo.*

Categoría tarifaria	Descripción
PDBT	Pequeña Demanda (hasta 25 kW-mes)
GDBT	Gran Demanda (mayor a 25 kW-mes) en Baja Tensión
RABT	Riego Agrícola en Baja Tensión
APBT	Alumbrado Público en Baja Tensión
APMT	Alumbrado Público en Media Tensión
GDMTH	Gran Demanda en Media Tensión Horaria
GDMTO	Gran Demanda en Media Tensión Ordinaria
RAMT	Riego Agrícola en Media Tensión
DIST	Demanda Industrial en Subtransmisión
DIT	Demanda Industrial en Transmisión

Fuente: Comisión Federal de Electricidad, 2017.

Dado que la planta de ciclo combinado se localiza cerca del mercado mayorista más grande del mundo, la Central de Abasto, ubicada en la Ciudad de México, las tarifas objetivo de ésta son las siguientes: APMT, GDMTH y DIT.

Como ya se ha mencionado el principal producto obtenido de este sistema es la energía eléctrica, aunque no es el único. Este sistema es una planta de Ciclo Combinado con Gasificación Integrada. Ya que esta tecnología cuenta con gasificación por plasma, también conocida como gasificación y fundición directa, se le pueden alimentar al gasificador cualquier tipo de residuos sólidos urbanos (RSU), desde residuos de materiales de construcción hasta biomasa, por lo que además del gas de síntesis utilizado en el ciclo combinado para la generación de energía eléctrica se puede obtener también materia prima para la construcción de edificios y carreteras (minerales vitrificados) y metales fundidos que pueden ser utilizados en la industria metalúrgica.

Los cambios recientes en la legislación energética mexicana dan pie a considerar proyectos de este tipo, en el que pueden abordarse dos problemáticas fundamentales del país, por un lado, se tiene la dependencia energética de México, que es un tema en el que se debe actuar inmediatamente y por el otro el reto de manejar adecuadamente los residuos sólidos generados diariamente. En el siguiente capítulo se expone la infraestructura con que dispone la Ciudad de México para atender la problemática ya mencionada.

## Capítulo 2

### **Residuos sólidos urbanos y métodos de disposición final.**

Debido a que durante los últimos años se ha intensificado la industrialización en México, la demanda de materia prima para la producción de bienes que satisfagan las necesidades de la población aumentó de forma súbita. Así mismo creció la generación de residuos de distintos tipos y los problemas asociados para su disposición adecuada, así como las afectaciones a la salud humana y al medio ambiente.

Además, debido a que la Ciudad de México es la capital del país se ha consolidado como uno de los centros económicos y culturales más importantes debido a la producción, distribución y consumo de bienes y servicios, actividades que inciden de manera directa en uno de los principales retos ambientales que enfrenta: el manejo de residuos. Por tal motivo el Gobierno de la Ciudad de México, preocupado por atender la situación, ha establecido políticas públicas e instrumentos que contribuyen a mejorar su manejo (SEDEMA, Inventario de Residuos Sólidos Urbanos, CDMX 2017, 2018).

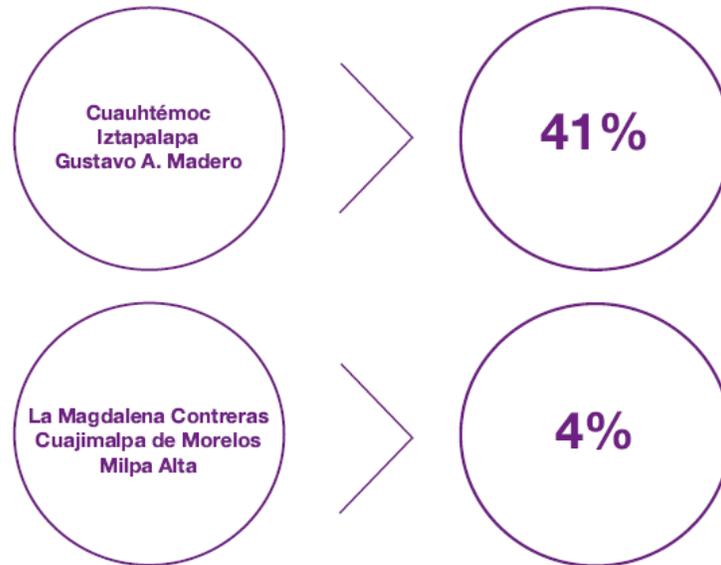
#### **2.1 Generación y clasificación de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México.**

La demanda creciente de bienes y servicios en la Ciudad de México trae consigo, entre otras problemáticas, el incremento en la generación de residuos sólidos urbanos, los cuales se producen en casas habitación, establecimientos, espacios públicos o vía pública. El manejo inadecuado de los RSU puede llegar a producir impactos negativos en el ser humano y el medio ambiente. Durante 2016, los habitantes y la población flotante que diariamente ingresa a la Ciudad de México generaron 12,920 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos (SEDEMA, Inventario de Residuos Sólidos Urbanos, CDMX 2017, 2018).

Dentro de la Ciudad de México las delegaciones con mayor generación de residuos son Iztapalapa, Gustavo A. Madero y Cuauhtémoc con el 18%, 13% y 10%, respectivamente; mientras que Cuajimalpa de Morelos, La Magdalena Contreras y Milpa Alta, aportan sólo el 4% de la generación total como se muestra en la Figura 6. (SEDEMA, Inventario de Residuos Sólidos Urbanos, CDMX 2017, 2018)

Cabe mencionar que la generación diaria de estos residuos por habitante en la ciudad se encuentra entre 0.86 y 2.44 kilogramos, siendo la delegación Cuauhtémoc la que reportó la mayor generación por habitante contrario a lo reportado por las delegaciones Milpa Alta y Álvaro Obregón, las cuales registraron la menor generación por habitante al día, estos datos se ven reflejados en la Tabla 5.

*Figura 6 Porcentaje de generación de residuos sólidos urbanos de las delegaciones.*



Fuente: Inventario de Residuos Sólidos, 2017.

*Tabla 5 Generación per cápita por delegación.*

Delegaciones con mayor generación per cápita de residuos sólidos	
Delegación	Generación per cápita (kg/habitante/día)
Cuauhtémoc	2.44
Miguel Hidalgo	2.24
Venustiano Carranza	1.98
Delegaciones con menor generación per cápita de residuos sólidos	
Delegación	Generación per cápita (kg/habitante/día)
Cuajimalpa	0.92
Álvaro Obregón	0.89
Milpa Alta	0.86

Fuente: Secretaría de Obras y Servicios, 2017.

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003 los Residuos Sólidos Urbanos se definen como aquellos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales

que se utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos. Estos residuos pueden ser clasificados a su vez en orgánicos e inorgánicos. Los orgánicos son todos aquellos desechos de origen biológico que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo y los inorgánicos son aquellos que no son de origen biológico.

Sin embargo, dentro de los residuos inorgánicos existen los residuos peligrosos y de manejo especial, entre los que se encuentran aparatos electrodomésticos, electrónicos, vehículos automotores al final de su vida útil y desechos de la industria de la construcción, por mencionar los más comunes.

Anteriormente, en la Ciudad de México, los desechos no recibían un tratamiento adecuado, es decir, eran llevados a los sitios de disposición final sin discriminación ni clasificación. Hasta antes de 2004 que se publicó en el Diario Oficial de la Federación la NOM-083-SEMARNAT-2003

## **2.2 Impacto de los residuos sobre la población y el medio ambiente**

La generación descontrolada de residuos sólidos, también conocidos como basura, y el manejo inadecuado de estos, representan problemas ambientales y de salud en México, que se han visto remarcados en los últimos años. Algunos de los impactos medioambientales que el mal manejo de los residuos mencionados puede provocar son los siguientes:

- Generación de contaminantes y gases de efecto invernadero: la descomposición de los residuos orgánicos produce biogases que resultan desagradables no sólo por los olores que generan, sino que pueden ser peligrosos debido a su toxicidad o por su explosividad. Algunos de ellos son también gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático global. Entre estos gases destacan el bióxido y monóxido de carbono ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ , respectivamente), metano ( $\text{CH}_4$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), como la acetona, benceno, estireno, tolueno y tricloroetileno.
- Adelgazamiento de la capa de ozono: las sustancias agotadoras del ozono (SAO) que se emplean en la fabricación de envases de unicel, como propulsores de aerosoles para el

cabello, en algunas pinturas y desodorantes, plaguicidas, así como en refrigeradores y sistemas de calefacción contribuyen, al ser liberados a la atmósfera, al adelgazamiento de la capa de ozono.

- Contaminación de los suelos y cuerpos de agua: la descomposición de los residuos y su contacto con el agua puede generar lixiviados (es decir, líquidos que se forman por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales) que contienen, en forma disuelta o en suspensión, sustancias que se filtran en los suelos o escurren fuera de los sitios de depósito. Los lixiviados pueden contaminar los suelos y los cuerpos de agua, provocando su deterioro y representando un riesgo para la salud humana y de los demás organismos.
- Proliferación de fauna nociva y transmisión de enfermedades: los residuos orgánicos que se disponen, atraen a un numeroso grupo de insectos, aves y mamíferos que pueden transformarse en vectores de enfermedades peligrosas como tifus murino, salmonelosis, cólera, amebiasis, disentería, toxoplasmosis, dengue, entre otras.

Es de suma importancia recalcar que los problemas ambientales más grandes en el mundo tienen relación con los residuos industriales peligrosos. El impacto producido por estos tipos de residuos industriales no puede eliminarse totalmente, no obstante, si es posible disminuirlo.

Existen alternativas recomendables, además del desarrollo de tecnologías limpias, entre las que se encuentran las siguientes: la optimización de procesos en cuanto a la disminución de los volúmenes generados de residuos, el reciclado, la reutilización de los residuos y el intercambio de desechos entre fábricas.

### **2.3 Manejo de los residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México**

Como ya se ha mencionado el gobierno de la Ciudad de México tiene la responsabilidad de darle tratamiento a todos los tipos de residuos y como parte de sus herramientas, cuenta con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos, la cual establece acciones normativas, operativas y de planeación, así como de monitoreo, supervisión y evaluación para el manejo de residuos, a fin de lograr beneficios ambientales en cada una de sus etapas del manejo, que son: generación, almacenamiento in situ, recolección, aprovechamiento y disposición final (SEDEMA, Inventario de Residuos Sólidos Urbanos, CDMX 2017, 2018).

Para lo anterior la Ciudad de México cuenta con la siguiente infraestructura:

*Figura 7 Instalaciones de la CDMX para el tratamiento de residuos.*

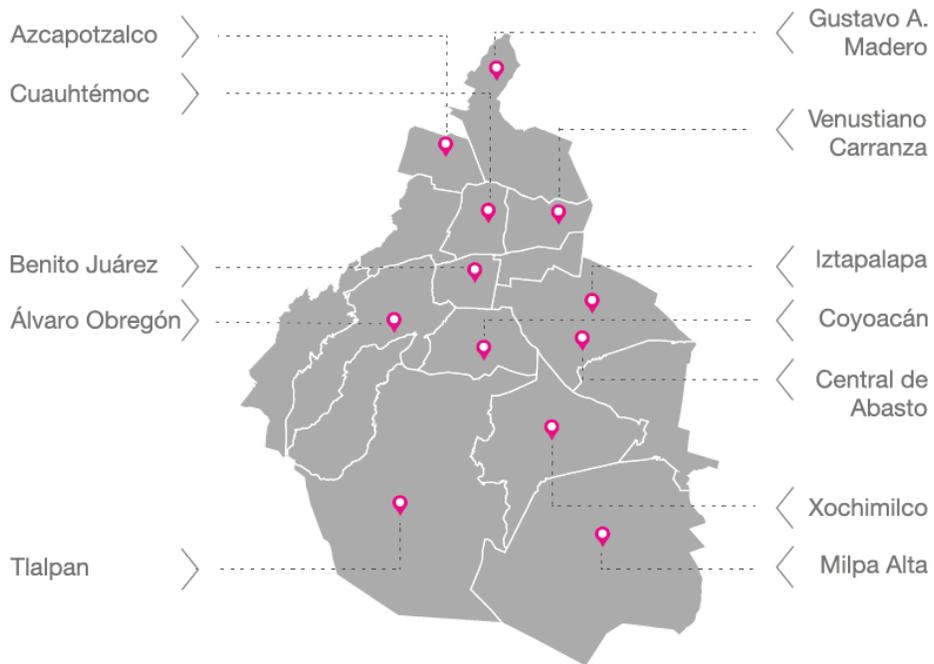


Fuente: Secretaría de Obras y Servicios, 2018.

A continuación, se definen cada una de las instalaciones antes mencionadas según el Inventario de Residuos Sólidos 2017:

Estaciones de transferencia: son instalaciones intermedias entre las fuentes generadoras de residuos sólidos (casas, negocios, industrias) y los distintos destinos, como las plantas de selección, composta y los sitios de disposición final. La ubicación de dichas estaciones se ve ilustrada en la Figura 8.

*Figura 8 Ubicación de estaciones de transferencia.*



Fuente: Secretaría de Obras y Servicios, 2018.

Plantas de selección: son espacios donde se realiza la separación y clasificación de materiales que conservan sus características físicas y químicas para su valorización e incorporación a cadenas productivas. El material no recuperado o rechazado se transporta a los sitios de disposición final.

La CDMX actualmente cuenta con dos plantas de selección de residuos sólidos urbanos:

- San Juan de Aragón: Fase I, Fase II y Patio
- Santa Catarina

Plantas de compactación: en estas plantas se forman pacas de RSU, aumentando la densidad de éstos y facilitando su manejo y transporte. En 2016 se enviaron a estas plantas compactadoras 785 toneladas diarias de residuos, ver Figura 9. En ese mismo año, el Gobierno de la Ciudad de México inauguró la Planta Compactadora de Residuos Sólidos Urbanos Iztapalapa 2, la más grande de América Latina ubicada en la Central de Abasto, que contribuirá al aprovechamiento de más de 6,600 toneladas de residuos generados diariamente en la capital del país.

Es de la Planta Compactadora de Residuos Sólidos Urbanos Iztapalapa 2 de donde se obtendrá la materia prima que será alimentada al gasificador junto con coque y caliza.

*Figura 9 Cantidad de residuos ingresados a plantas compactadoras.*

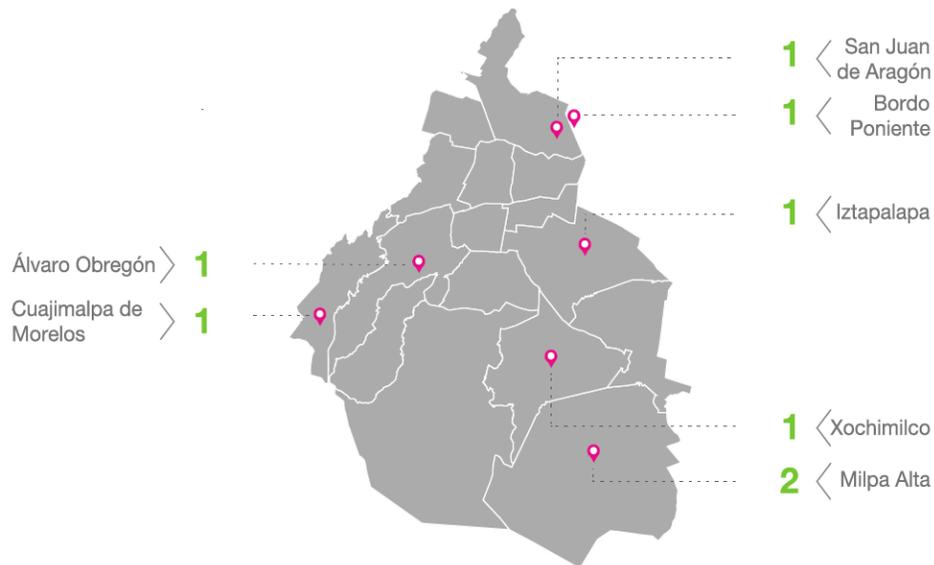


Fuente: Secretaría de Obras y Servicios, 2018

Plantas de composta: en estas plantas son procesados los residuos orgánicos biodegradables que permiten la obtención de subproductos que pueden reincorporarse a ciclos productivos, tales

como la biomasa aprovechable, agua, y algunos gases como el dióxido de carbono y metano. Se encuentran distribuidas en la CDMX como se muestra en la Figura 10.

*Figura 10 Ubicación de las plantas de composta.*



Fuente: Secretaría de Obras y Servicios, 2018

Sitios de disposición final: también conocidos como Rellenos Sanitarios son obras de infraestructura que aplican métodos de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos que por sus características no pudieron ser incorporados a procesos productivos, minimizando así los riesgos por contaminación al ambiente y a la salud.

Los sitios de disposición final cobran importancia en una ciudad como la CDMX por la cantidad de residuos generados, éstos pueden ser una gran ayuda o representar un verdadero problema. Desde el cierre definitivo de la IV Etapa del relleno sanitario Bordo Poniente, la Ciudad de México no cuenta con un espacio donde disponer sus residuos, por lo que a través de acuerdos con otros estados se usan cuatro rellenos ubicados en el Estado de México: Chicoloapan, Cuautla, Milagro y Cañada, y uno en Morelos: Cuautla, que inminentemente serán cerrados cuando lleguen a su límite.

Es preciso mencionar que los residuos de la construcción, que son aquellos constituidos por un conjunto de materiales producto de la construcción, demolición, desmantelamiento y/o excavación, no deberían ser llevados a los sitios de disposición final ya que requieren un manejo

especial, y presentan alto potencial de reúso o reciclaje. Motivo por el cual la Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México cuenta con una planta itinerante que puede ser solicitada por las delegaciones para el procesamiento de este tipo de residuos.

Los rellenos sanitarios son considerados métodos tradicionales de disposición final.

## **2.4 Métodos alternativos de disposición final.**

Ya que se han mencionado las instalaciones que reporta el Gobierno de la Ciudad de México para la recolección, selección, tratamiento y disposición final es imperativo mencionar otros métodos que, si bien no forman parte de los procesos de disposición de la Ciudad de México, si son tecnologías que se utilizan alrededor del mundo, principalmente en Estados Unidos de América, Europa y Japón. Estas tecnologías realizan la conversión de residuos a energía, cada una de estas soluciones tiene características específicas. Entre las tecnologías disponibles actualmente, capaces de convertir residuos a energía se encuentran las termoquímicas, las bioquímicas y las químicas, ver Figura 11. Las tecnologías mencionadas ofrecen un panorama general de las opciones disponibles en el mercado sin dejar de lado las investigaciones y desarrollos enfocados a la promoción de las alternativas más estables.

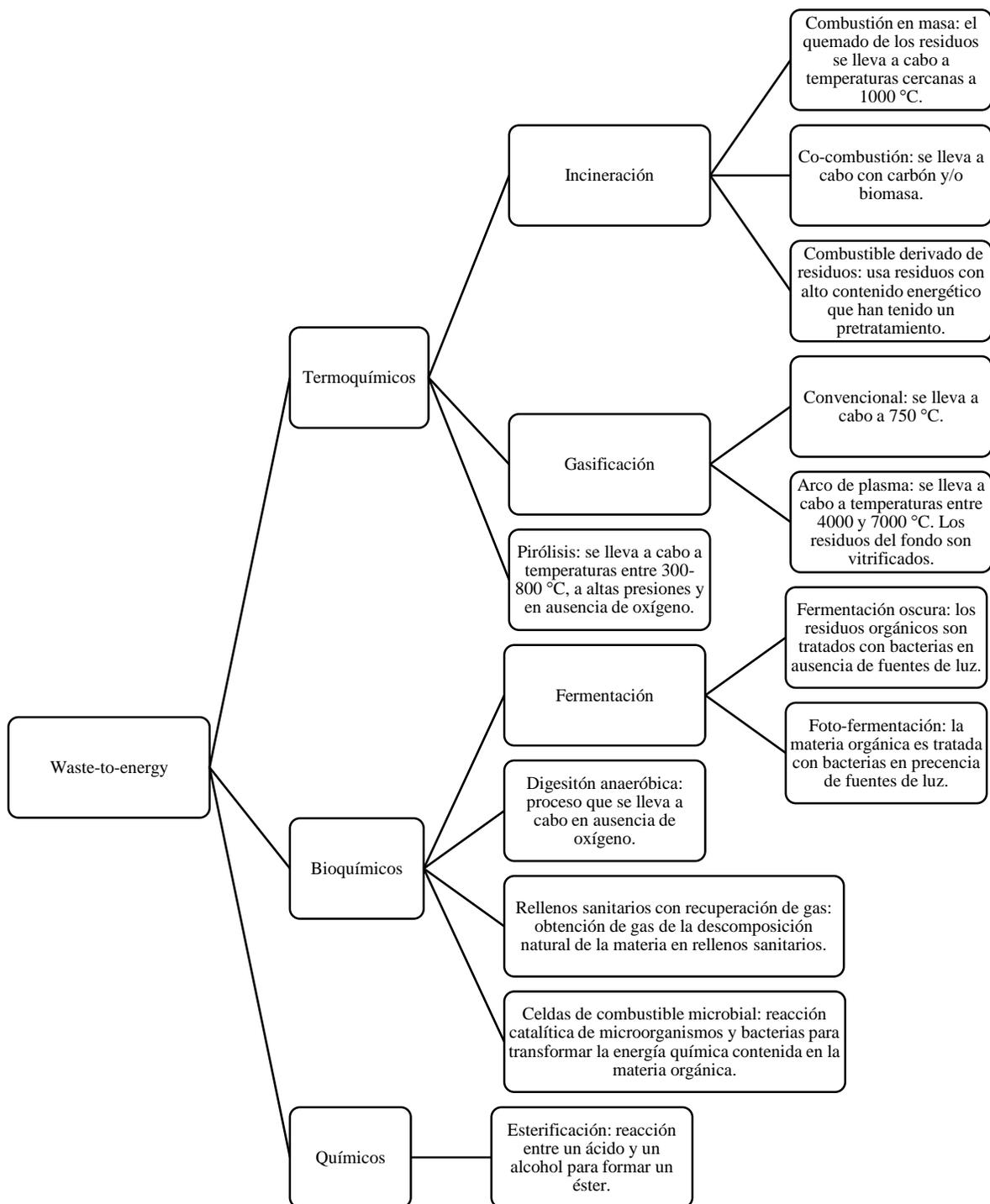
Las tecnologías mencionadas a continuación son opciones para obtener algún beneficio mediante el tratamiento termoquímico.

Las tecnologías de conversión termoquímica son usadas para recuperar energía a partir de los Residuos Sólidos Urbanos mediante el uso de altas temperaturas. Dentro de este tipo de tecnologías se encuentran la Combustión o Incineración, Gasificación y la Pirólisis. Las principales diferencias entre estas tecnologías son: cantidad de exceso de aire utilizado, la temperatura dentro del proceso que conduce a la conversión del producto final CO<sub>2</sub> y la utilización de vapor de agua.

### **Combustión**

La combustión de Residuos Sólidos Urbanos es la oxidación parcial del material combustible contenido en los residuos sólidos. Durante la combustión del material sólido, muchos procesos complejos suceden simultáneamente.

Figura 11 Tecnologías disponibles para la conversión “Waste-to-Energy”<sup>2</sup>.



Fuente: World Energy Council, World Energy Resources (traducción), 2016.

<sup>2</sup> Traducción: Residuos a energía.

Inicialmente, el calor en la cámara de combustión evapora la humedad contenida en los residuos sólidos y volatiliza los componentes de los residuos sólidos, los gases resultantes son activados en presencia de aire para así iniciar el proceso de combustión per se. El proceso lleva a cabo una conversión de combustible sólido en gas de combustión, cenizas y calor. El calor liberado se usa para producir vapor a alta presión, que es enviado a una turbina de vapor acoplada a un generador de energía eléctrica, o usado para suministrar vapor de proceso. Dependiendo de las opciones de tratamiento de las cenizas de los fondos, metales ferrosos y no ferrosos también pueden ser recuperadas y las cenizas restantes pueden ser tratadas para ser usadas para la construcción de carreteras y edificios.

### Gasificación

La gasificación de residuos sólidos es la oxidación parcial de combustible residual en la presencia de un oxidante en cantidades menores a las necesarias para la combustión estequiométrica. El proceso de gasificación transforma cualquier residuo sólido o materia prima a base de carbón en subproductos útiles que contienen cantidades significantes de compuestos parcialmente oxidados, principalmente una mezcla de monóxido de carbono, hidrogeno y dióxido de carbono. El gas producido, que recibe el nombre de syngas (gas de síntesis), puede ser usado en diferentes aplicaciones después del proceso de limpiado, lo cual es el reto más grande para comercializar este tipo de plantas a gran escala. Una vez que el gas de síntesis ha sido limpiado, este puede ser usado para generar combustibles de gran calidad, gas natural sintético (SNG) o usado en la industria química; este gas puede ser usado en turbinas de gas más eficientes y/o motores de combustión interna o puede ser quemado en un quemador convencional que esté conectado a un generador de vapor y una turbina de vapor.

### Pirólisis

La pirólisis de residuos sólidos está definida como una descomposición térmica de combustible residual a temperaturas elevadas, aproximadamente entre 500 °C y 800 °C, los residuos sólidos urbanos son transformados en gas de síntesis en la ausencia de aire, alquitrán y productos sólidos. El principal objetivo de la pirólisis es descomponer los residuos sólidos a gases y fases condensadas. La cantidad de productos útiles de la pirólisis y su proporción depende completamente de la temperatura a la que se lleve a cabo la descomposición y tasa de calentamiento.

Resumen de las principales diferencias entre los procesos termoquímicos antes descritos, ver Tabla 6.

*Tabla 6 Comparación entre Pirólisis, Gasificación y Combustión.*

Pirólisis	Gasificación	Combustión
Usualmente no hay aire presente	Cantidad de oxígeno inferior al estequiométrico.	Exceso de oxígeno / Muy exotérmico
Se requiere un producto líquido	Baja cantidad de ceniza flotante	Gran cantidad de ceniza flotante
Contaminantes en forma reducida (H <sub>2</sub> S, CO <sub>2</sub> )	Contaminantes en forma reducida (H <sub>2</sub> S, CO <sub>2</sub> )	Contaminantes en forma oxidada (NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , etc)
Alta producción de carbón pirolítico	Gran cantidad de escoria vitrificada	Cenizas en fondos

Fuente: World Energy Council, World Energy Resources (traducción), 2016.

## Capítulo 3

### Ciclos termodinámicos.

Así como el carbón, el gas natural o el petróleo, los combustibles residuales como los Residuos Sólidos Urbanos y el producto de la gasificación de estos, que es el syngas, no se pueden usar directamente para realizar un trabajo. Estas fuentes de energía realizan la combustión para generar calor que se convierte después en energía mecánica y/o energía eléctrica. Para que la energía liberada por la combustión de estos combustibles sea aprovechada se deben controlar en la mayoría de los casos las siguientes variables: Presión (P), Temperatura (T) y Volumen (V), por lo tanto, estos procesos son gobernados por ciclos termodinámicos en los que la eficiencia de primera ley de la termodinámica está limitada por la tecnología disponible.

Los ciclos termodinámicos se pueden dividir tradicionalmente en dos categorías generales: los ciclos de potencia y los ciclos de refrigeración (actualmente con los llamados ciclos orgánicos no necesariamente son excluyentes). Existen máquinas propias de cada uno de estos grupos, es así como los dispositivos o sistemas que se usan para producir una salida neta de potencia se llaman a menudo motores o máquinas térmicas y los ciclos termodinámicos en los que operan se llaman ciclos de potencia, y los ciclos de refrigeración utilizan los dispositivos o sistemas que se llaman refrigeradores, acondicionadores de aire o bombas térmicas.

Los ciclos termodinámicos también pueden ser clasificados dependiendo de la fase del fluido de trabajo como: ciclos de gas, en donde se utiliza un fluido de trabajo en la fase gaseosa durante todo el ciclo y los ciclos de vapor, en los que el fluido de trabajo existe en fase de vapor durante una parte del ciclo y en fase líquida durante otra parte. (Cengel, 2012)

Otra clasificación posible es: ciclos cerrados y abiertos. Se dice que un ciclo es cerrado cuando éste está definido por un límite o frontera impermeable a la transferencia de masa. Por el contrario, los sistemas abiertos están definidos por límites que pueden ser atravesados por flujos másicos (Bejan, 2016).

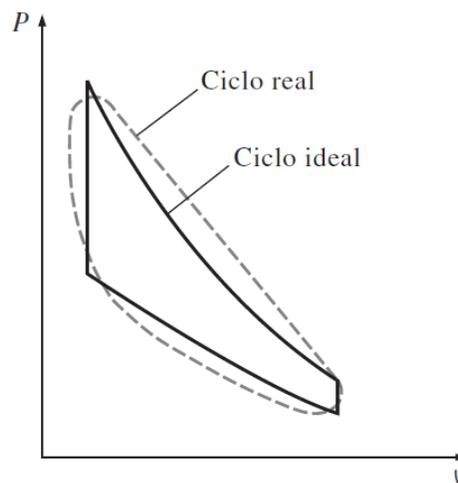
El ciclo de Carnot es considerado un ciclo termodinámico ideal. Es el ciclo más eficiente posible para convertir una cantidad dada de energía térmica en trabajo o viceversa para usar una cantidad dada de trabajo con propósitos de refrigeración.

En el presente trabajo se hace énfasis en los ciclos de potencia y se presentan sus ecuaciones más representativas, especialmente de los ciclos Brayton y Rankine.

### 3.1 Consideraciones básicas para el análisis de los ciclos de potencia

La dificultad del análisis de los ciclos que se llevan a cabo en dispositivos reales radica en la presencia de efectos complicados, como la fricción y la falta de tiempo suficiente para establecer las condiciones de equilibrio durante el ciclo. El mantener estas complejidades en un nivel simple y utilizar algunas idealizaciones pueden hacer factible el estudio analítico de un ciclo y frecuentemente las conclusiones del análisis de ciclos ideales son aplicables a los reales, ver Figura 12.

*Figura 12 El análisis de muchos procesos complejos puede ser reducido a un nivel simple utilizando algunas idealizaciones.*



Fuente: Termodinámica, Yunus A. Cengel, 2012.

Las máquinas térmicas se diseñan con el propósito de convertir energía térmica en trabajo y su desempeño se expresa en términos de la eficiencia térmica  $\eta_{tér}$ , que es la relación entre el trabajo neto producido por la máquina y la entrada de calor total:

$$\text{Ecuación 1} \quad \eta_{tér} = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}}$$

Los ciclos internamente reversibles incluyen irreversibilidades externas al sistema como la transferencia de calor debida a una diferencia de temperatura con el medio en el que se

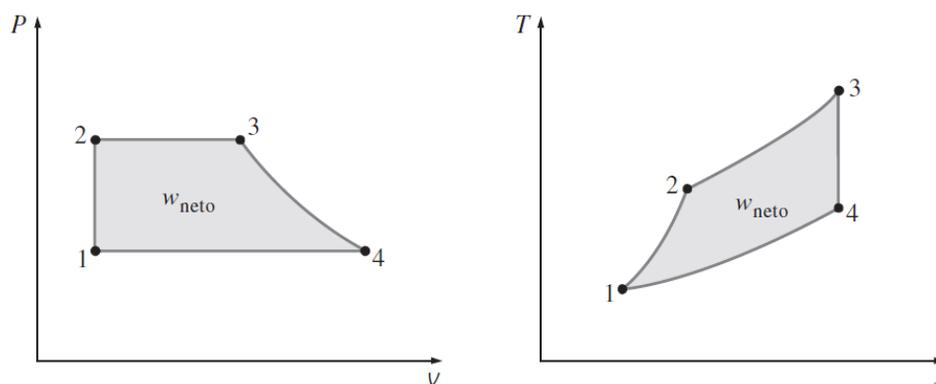
encuentran. Por lo tanto, la eficiencia térmica de un ciclo ideal, en general, es menor que la de un ciclo internamente reversible que opera entre los mismos límites de temperatura. No obstante, esta eficiencia es considerablemente más alta que la eficiencia térmica de un ciclo real debido a las idealizaciones utilizadas.

Las idealizaciones y simplificaciones empleadas comúnmente en el análisis de los ciclos de potencia pueden resumirse del siguiente modo:

1. El ciclo no implica ninguna fricción. Por lo tanto, el fluido de trabajo no experimenta ninguna caída de presión cuando fluye en tuberías o dispositivos como los intercambiadores de calor.
2. Todos los procesos de expansión y compresión ocurren en la forma de cuasi equilibrio. Además, estos procesos son isoentrópicos,
3. Las tuberías que conectan a los diferentes componentes de un sistema están muy bien aisladas y la transferencia de calor a través de ellas es insignificante.

Los diagramas de propiedades como los  $P-V$  o  $T-s$  son auxiliares valiosos en el análisis de procesos termodinámicos, en ambos diagramas el trabajo neto producido durante el ciclo se encuentra representado por el área encerrada por las curvas del proceso, ver Figura 13, que es también equivalente a la transferencia de calor neta en ese ciclo.

*Figura 13 Diagramas  $T-s$  y  $P-V$  para un ciclo de potencia.*

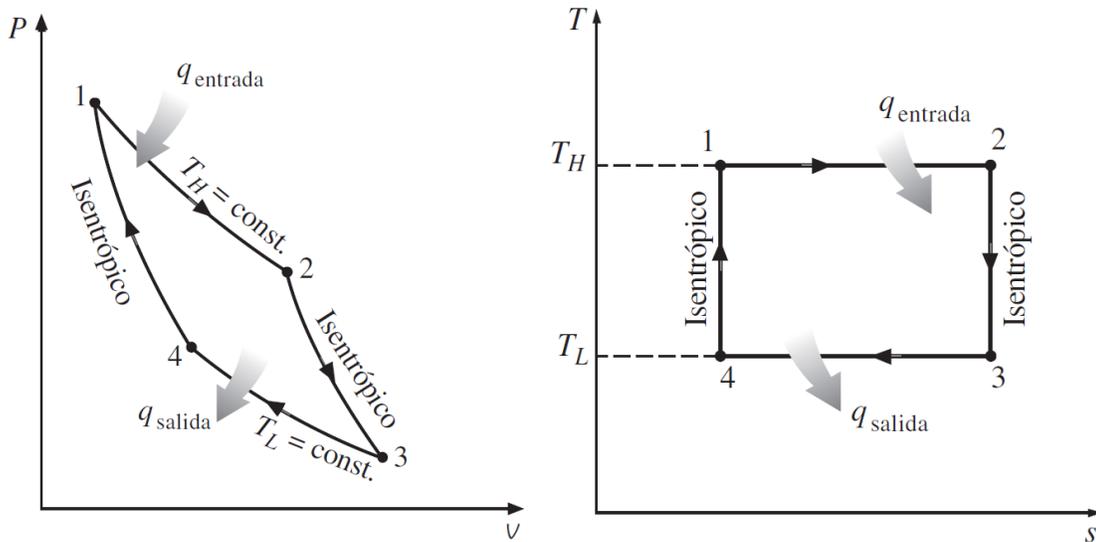


Fuente: Termodinámica, Yunus A. Cengel, 2012.

El ciclo de Carnot se compone de cuatro procesos reversibles: adición de calor isotérmica, expansión isentrópica, rechazo de calor isotérmico y compresión isentrópica. Este ciclo cobra importancia ya que éste es el estándar contra el cual pueden compararse ciclos reales, ver Figura

14. La eficiencia térmica del ciclo de Carnot es una función de las temperaturas del sumidero y de la fuente y lo que la eficiencia de este ciclo nos indica es lo siguiente: la eficiencia térmica aumenta con un incremento en la temperatura promedio a la cual se suministra calor hacia el sistema o con una disminución en la temperatura promedio a la cual el calor se rechaza del sistema (Cengel, 2012)

Figura 14 Diagramas P-V y T-S de un ciclo de Carnot.



Fuente: Termodinámica, Yunus A. Cengel, 2012.

Además, este ciclo de Carnot es el ciclo más eficiente que puede ejecutarse entre una fuente de energía térmica a temperatura  $T_H$  y un sumidero a temperatura  $T_L$ , y su eficiencia térmica se expresa como

$$\text{Ecuación 2} \quad \eta_{\text{tér. Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Si bien se ha mencionado que el aumento en la temperatura de suministro al sistema o la disminución de la temperatura de rechazo del sistema pueden significar una mejora en la eficiencia de este ciclo, estas temperaturas tienen límites, es decir, la temperatura de la fuente está limitada por la temperatura máxima que pueden soportar los componentes de la máquina térmica, como los álabes de la turbina y la temperatura de rechazo está limitada por la temperatura del sumidero, como un lago, un río o el aire atmosférico (Cengel, 2012). A través de los años se ha

buscado que estas máquinas permitan la utilización de temperaturas más elevadas para incrementar su eficiencia como es el caso de las turbinas de gas, ver Tabla 7.

*Tabla 7 Clasificación comercial de las turbinas de gas.*

<b>Clase</b>	$T_{TG}^{ent}$ (K)	$r_p$	$\eta_{TGG}$ (%)
D, E	1573	12 – 14	34 – 37
F <sup>1</sup>	1673	16 – 17	36 – 38
F <sup>2</sup> , G y H	1773	18 – 20	39 – 40
J	1873	~ 23	41 – 44
J+ <sup>3</sup> , X <sup>4</sup>	1973	~ 25, >30	~ 45

<sup>1</sup> Clase F de 1ª generación,

<sup>2</sup> Clase F de última generación,

<sup>3</sup> Clase J avanzada,

<sup>4</sup> Experimental.

Fuente: (Herrera-Toledo, 2018).

La temperatura de diseño de los gases de combustión que entran a la turbina de gas en el sistema aquí presentado es de 887 °C (1160 K) a 1013.25 kPa. Esta condición sugiere utilizar una turbina Clase D o E cuya temperatura de entrada máxima es de 1573 K.

No es extraño pensar en este ciclo como el ideal para las centrales eléctricas de vapor sabiendo que es el más eficiente de los ciclos que operan entre dos límites especificados de temperatura. Sin embargo, el ciclo de Carnot de flujo estacionario no es un modelo apropiado para los ciclos de potencia debido a las siguientes situaciones imprácticas asociadas a él:

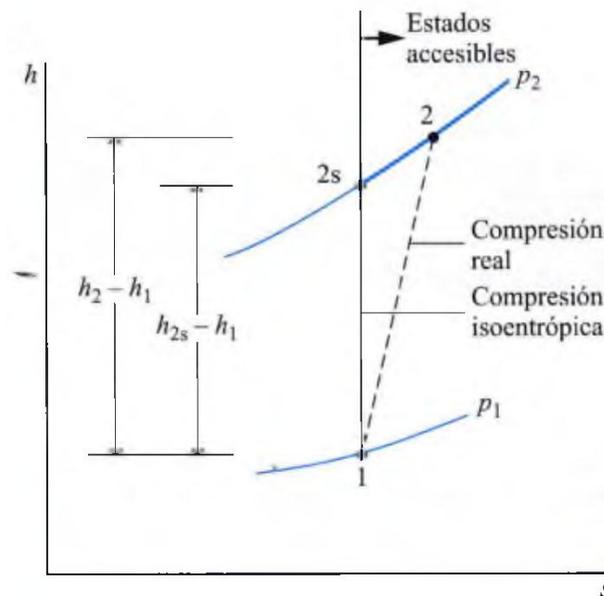
1. La transferencia isotérmica de calor hacia o desde un sistema de dos fases no es difícil de alcanzar en la práctica, porque una presión constante en el dispositivo fija automáticamente la temperatura en el valor de saturación. Sin embargo, restringir los procesos de transferencia de calor a sistemas de dos fases limita severamente la temperatura máxima que puede utilizarse en el ciclo (tiene que permanecer debajo del valor del punto crítico, el cual es de 374 °C para el agua). Restringir la temperatura máxima en el ciclo limita también la eficiencia térmica.

2. En ciclos de este tipo la calidad del vapor disminuye durante la expansión isoentrópica, ver Figura 16, (expansión en la turbina), es decir, la turbina tiene que manejar vapor con alto contenido de humedad. El choque de gotas líquidas sobre los álabes de la turbina produce erosión y es una de las principales fuentes de desgaste. Así, el vapor con calidades menores a 90 por ciento no puede ser tolerado en la operación de centrales eléctricas.

Esta condición es de particular interés debido a que cuando no se produce una transferencia apreciable de calor con los alrededores ni tampoco existen variaciones significativas de energía cinética y potencial, el trabajo consumido por unidad de masa

$$\text{que fluye a través del compresor es } \left( -\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}} \right) = h_2 - h_1$$

Figura 15 Comparación de los procesos de compresión real e isoentrópica.



Fuente: Fundamentos de Termodinámica Técnica, Moran, 2004.

Como el estado 1 es una condición de diseño, la entalpía específica  $h_1$  es conocida. Con base en lo anterior, el valor del trabajo consumido dependerá de la entalpía de salida,  $h_2$ . El consumo mínimo de trabajo corresponderá al menor valor alcanzable para la entalpía específica en la salida del compresor. De forma análoga se plantea la

ecuación para un proceso de compresión isentrópico, como el presente en el ciclo de

Carnot. Así el mínimo consumo de trabajo está dado por  $\left(-\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}}\right)_s = h_2 - h_1$ .

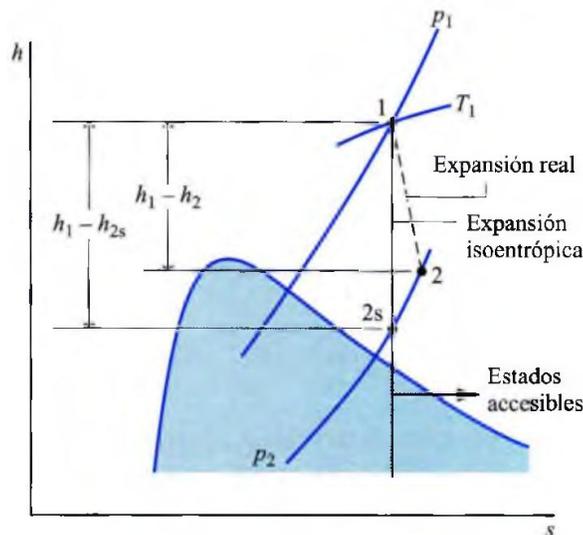
En un proceso de compresión real se cumplirá que  $h_2 > h_{2s}$  y, por tanto, se requerirá consumir una cantidad mayor de trabajo que la mínima. La diferencia entre ambos casos, el proceso real y el isentrópico (reversible), puede medirse mediante la eficiencia isentrópica del compresor utilizado, definida por la ecuación 3:

$$\text{Ecuación 3} \quad \eta_c = \frac{\left(-\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}}\right)_s}{\left(-\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}}\right)}$$

De forma similar es posible plantear la ecuación de eficiencia isentrópica, para el proceso de expansión del ciclo de Carnot, con la ayuda del diagrama de Mollier de la Figura 17, de la siguiente forma:

$$\text{Ecuación 4} \quad \eta_E = \frac{\left(-\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}}\right)}{\left(-\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}}\right)_s}$$

Figura 16 Comparación de las expansiones real e isentrópica en una turbina.



Fuente: Fundamentos de Termodinámica Técnica, Moran, 2004.

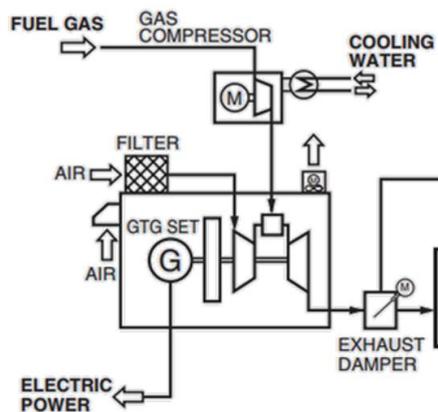
3. El proceso de compresión isoentrópica implica la compresión de una mezcla de líquido y vapor hasta un líquido saturado. Hay dos dificultades asociadas con este proceso: primero, no es fácil controlar el proceso de condensación de manera tan precisa como para obtener finalmente la calidad deseada; y segundo, no es práctico diseñar un compresor que maneje dos fases.

Es por lo anterior que se concluye que el ciclo de Carnot no puede llevarse a cabo en dispositivos reales y no es un modelo realista para los ciclos de potencia de vapor.

### 3.2 Ciclo Brayton

El ciclo Brayton se usa únicamente para turbinas de gas donde los procesos de compresión y expansión se llevan a cabo en dispositivos rotatorios. Las turbinas de gas son usadas en plantas de potencia estacionarias para la generación de energía eléctrica como unidades independientes o en conjunto con plantas generadoras de vapor.

*Figura 17 Representación de turbina de gas a ciclo abierto.*



Fuente: Kawasaki Gas Turbine, 2019.

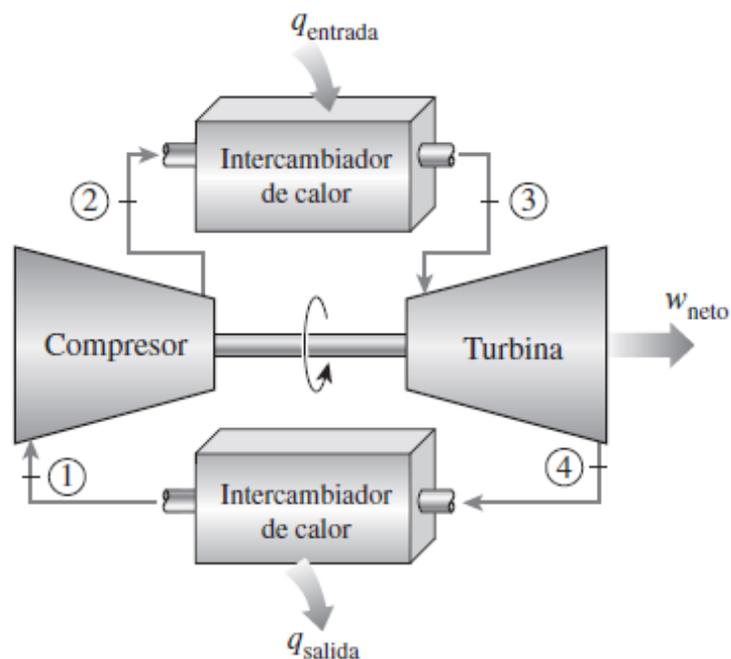
Las turbinas de gas operan usualmente en un sistema como el mostrado en la Figura 17. Se alimenta aire “fresco” a condiciones estándar (ambiente) mediante el compresor, donde su temperatura y presión se elevan. El aire a alta presión entra entonces a la cámara de combustión, donde se quema el combustible a presión constante. Los gases a alta presión resultado de la combustión entran a la turbina, donde se expanden a presión atmosférica a través de los álabes de ésta. Esta expansión provoca que dichos álabes empiecen a girar moviendo así un eje dentro de una bobina magnética. Cuando el eje empieza a girar dentro de la bobina magnética se produce

una corriente eléctrica. Los gases exhaustos que abandonan la turbina en ciclo abierto no son recirculados.

El ciclo descrito anteriormente puede ser modelado como un ciclo cerrado, ver Figura 18, con la diferencia de que el proceso de combustión es sustituido por uno de adición de calor a presión constante desde una fuente externa, mientras que el proceso de escape se reemplaza por otro de rechazo de calor a presión constante al medio ambiente. Este ciclo ideal es el ciclo Brayton, el cual está integrado por cuatro procesos internamente reversibles:

- 1-2 Compresión isentrópica
- 2-3 Adición de calor a presión constante
- 3-4 Expansión isentrópica (en una turbina)
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante

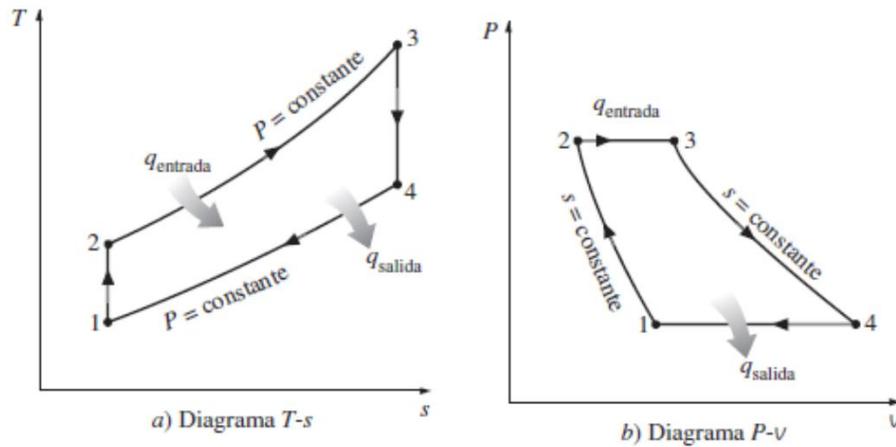
*Figura 18 Motor de turbina de gas de ciclo cerrado.*



Fuente: Termodinámica, Yunus A. Cengel, 2012.

En la Figura 19 se muestran los diagramas T-s y P-V de un ciclo Brayton ideal. En éstos se puede observar que los cuatro procesos del ciclo Brayton se ejecutan en dispositivos de flujo estacionario, por lo tanto, deben ser analizados como procesos de flujo estacionario.

Figura 19 Diagramas T-s y P-v para un ciclo Brayton ideal.



Fuente: Termodinámica, Yunus A. Cengel, 2012.

La ecuación de balance de energía puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 5} \quad (q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{out} - h_{in}$$

Dónde  $q_{in}$  es la cantidad de calor suministrado en la caldera y  $q_{out}$  es la cantidad de calor removido del condensador (en el caso de sistemas de ciclo cerrado) o calor extraído por la corriente exhausta (en el caso de ciclo abierto).  $W_{in}$  es el trabajo requerido por la bomba y  $W_{out}$  es el trabajo ejercido por la turbina. La entalpía de la corriente está dada por  $h$ . El calor transferido hacia y desde el fluido de trabajo puede ser expresado como:

$$q_{in} = h_3 - h_2 = Cp(T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = Cp(T_4 - T_1)$$

dónde,  $Cp$  es el calor específico a presión constante y  $T$  representa la temperatura en Kelvin (K). La eficiencia térmica de un ciclo Brayton ideal puede expresarse como:

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{Cp(T_4 - T_1)}{Cp(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left( \frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

Los procesos 1-2 y 3-4 son isoentrópicos. Para un proceso adiabático de cuasi equilibrio relacionado con un gas ideal, se deben tomar las siguientes consideraciones (Ghosh K, 2009):

$$Tv^{k-1} = \text{constante}, TP^{\left(\frac{1-k}{k}\right)} = \text{constante}, Pv^k = \text{constante}$$

Dónde,  $k$  es la relación de calores específicos ( $k = Cp / Cv$ ).  $Cp$  es el calor específico a presión constante y  $Cv$  es el calor específico a volumen constante. Ya que,  $P_2 = P_3$ , y  $P_4 = P_1$ , las relaciones de temperatura deben expresarse en términos de la presión (P) como se indica a continuación:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

De la Figura 13 se sabe que  $P_2 = P_3$ , y  $P_4 = P_1$  se deduce que  $T_4 = T_3$  y que  $T_1 = T_2$ , por lo que la eficiencia de este ciclo se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Ecuación 6} \quad \eta = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}$$

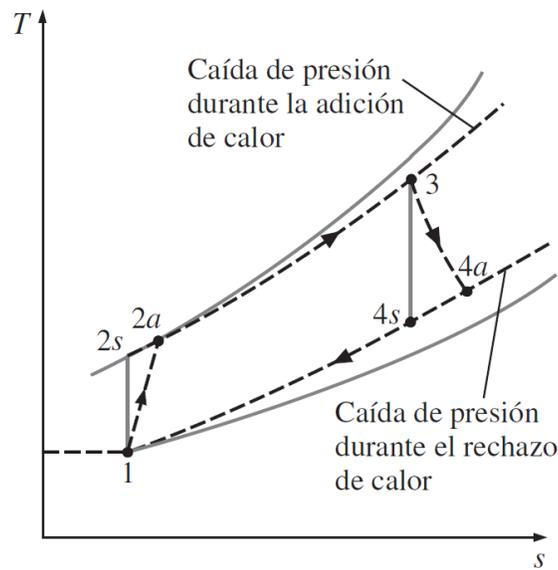
### **Desviación de los ciclos reales de turbina de gas en comparación con los idealizados**

Existen varias razones por las que los ciclos reales de gas difieren del ciclo Brayton ideal. Una de ellas es que la disminución de presión durante los procesos de adición y rechazo de calor es inevitable sin dejar de lado que la entrada de trabajo real al compresor será mayor y la salida de trabajo real de la turbina será menor debido a irreversibilidades. Los comportamientos reales desviados, del compresor y la turbina, del comportamiento isoentrópico idealizado puede ser calculado con precisión utilizando las eficiencias isoentrópicas de estas máquinas térmicas, definidas como

$$\eta_C = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2_s} - h_1}{h_{2_a} - h_{4_s}} \text{ para el compresor y } \eta_T = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4_a}}{h_3 - h_{4_s}} \text{ para la turbina}$$

Donde los estados 2a y 4a son los estados de salida reales del compresor y la turbina respectivamente, y 2s y 4s son los correspondientes al caso isoentrópico como se puede ver en la Figura 20.

*Figura 20 Desviación de un ciclo de turbina de gas real del ciclo Brayton ideal como resultado de irreversibilidades.*



Fuente: Termodinámica, Yunus A. Cengel, 2012.

### 3.3 Ciclos de potencia de vapor.

El ciclo Rankine puede ser clasificado como ciclo de potencia de vapor. Un ciclo en el que el fluido de trabajo se evapora y condensa alternadamente a diferencia de un ciclo Brayton, en donde el fluido de trabajo permanece como gas durante todo el ciclo.

El fluido de trabajo más utilizado en ciclos de potencia de vapor es el vapor de agua debido a muchas atractivas características como son: bajo costo, disponibilidad y alta entalpía de vaporización.

#### Ciclo Rankine

Lo que resulta de eliminar muchos de los aspectos imprácticos asociados con el ciclo de Carnot como sobrecalentar el vapor en la caldera y condensar por completo en el condensador, es el ciclo Rankine, el cual es el ciclo ideal para centrales eléctricas de vapor. Este ciclo no incluye

ninguna irreversibilidad interna y está compuesto de los siguientes cuatro procesos, ver Figura 21:

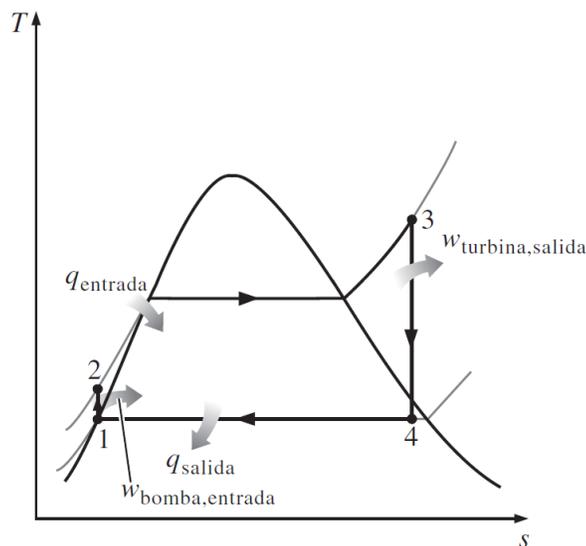
1-2 Compresión isoentrópica en una bomba

2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera

3-4 Expansión isoentrópica en una turbina

4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador

*Figura 21 Ciclo Rankine ideal simple.*



Fuente: Termodinámica, Yunus A. Cengel, 2012.

El ciclo inicia con agua que entra a la bomba en el estado 1 como líquido saturado y se condensa isoentrópicamente hasta la presión de operación de la caldera, estado 2, aumentando, un poco, la temperatura de ésta debido a la ligera disminución en el volumen específico.

Es en este estado (líquido comprimido) que el agua entra a la caldera y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3. El vapor sobrecalentado entra a la turbina donde se expande isoentrópicamente y produce trabajo al hacer girar el eje conectado a un generador eléctrico. La presión y la temperatura del vapor disminuyen durante este proceso hasta los valores en el estado 4, donde el vapor entra al condensador. En este estado el vapor es por lo general un vapor húmedo con una alta calidad. El vapor se condensa a presión constante en el condensador, el cual es básicamente un gran intercambiador de calor, rechazando el calor hacia un medio de enfriamiento como un lago, un río o la atmósfera. El vapor sale del condensador como líquido

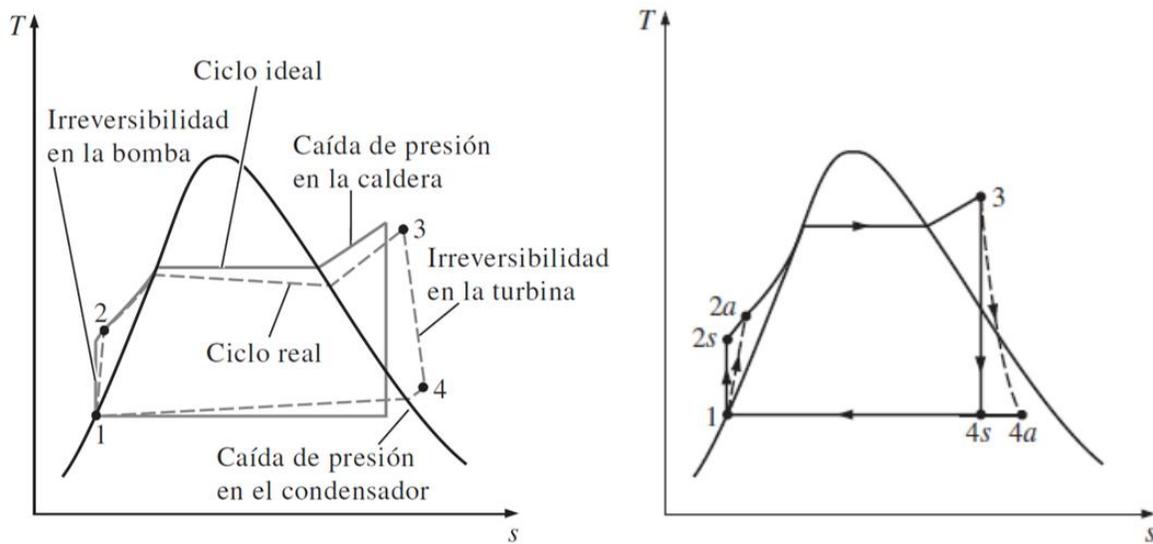
saturado y entra a la bomba, completando el ciclo. En áreas donde el agua es muy valiosa, las centrales eléctricas son enfriadas con aire en lugar de agua. Este método de enfriamiento, que también se emplea en motores de automóvil, es conocido como enfriamiento seco.

No se debe olvidar que el área bajo la curva del proceso en un diagrama  $T-s$  representa la transferencia de calor para procesos internamente reversibles; y observe que el área bajo la curva del proceso 2-3 representa el calor transferido hacia el agua en la caldera y que el área bajo la curva del proceso 4-1 representa el calor rechazado en el condensador. La diferencia entre estas dos (el área encerrada por el ciclo) es el trabajo neto producido durante el ciclo.

### 3.4 Desviación de los ciclos de potencia de vapor reales respecto de los idealizados.

La desviación de la idealidad de estos ciclos se da principalmente como resultado de las irreversibilidades en diversos componentes, ver Figura 22. Ejemplos de estas irreversibilidades son: la fricción del fluido de trabajo y las pérdidas de calor hacia los alrededores.

Figura 22 a) Desviación del ciclo real de potencia de vapor respecto del ciclo Rankine ideal. b) Efectos de las irreversibilidades de la bomba y la turbina en el ciclo Rankine ideal.



Fuente: Termodinámica, Yunus A. Cengel, 2012.

La fricción del fluido ocasiona caídas de presión en la caldera, el condensador y las tuberías, entre otros componentes. Es por esta razón que el agua debe bombearse a una presión más alta que la que tiene el ciclo ideal. Este hecho también requiere una bomba más grande y una mayor entrada de trabajo a la bomba.

Es importante tener en cuenta también las irreversibilidades por pérdida de calor del vapor hacia los alrededores cuando el fluido circula por varios componentes. Con la finalidad de mantener el mismo nivel de salida de trabajo neto de la turbina es imperativo transferir más calor hacia el vapor en la caldera para compensar las pérdidas de calor antes mencionadas. Este hecho aumenta la entropía del sistema y como consecuencia, la eficiencia del ciclo disminuye.

Se debe prestar atención a las irreversibilidades que suceden dentro de la bomba y la turbina ya que la bomba requiere una entrada de trabajo mayor y una turbina produce una salida de trabajo más pequeña como consecuencia de éstas. Bajo condiciones ideales, el flujo a través de estos dispositivos es isoentrópico. La desviación existente entre bombas y turbinas reales respecto de las isoentrópicas puede ser tomada en cuenta utilizando eficiencias isoentrópicas,

$$\text{definidas como: } \eta_p = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad \text{y} \quad \eta_c = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$

donde los estados 2a y 4a reales de salida de la bomba y de la turbina, respectivamente, mientras de 2s y 4s son los estados correspondientes para el caso isoentrópico, ver Figura 20.

### **3.5 Ciclos de potencia combinados (gas y vapor)**

Es cierto que los ciclos de potencia ya mencionados son capaces de generar energía eléctrica por sí mismos. Sin embargo, la búsqueda de eficiencias térmicas más altas ha guiado a los ingenieros a utilizar la energía disponible contenida en los gases de combustión de la turbina de gas. Es así como los productos (salidas) de un ciclo, como es el ciclo Brayton forman parte del proceso del ciclo Rankine, dando origen a los ciclos combinados.

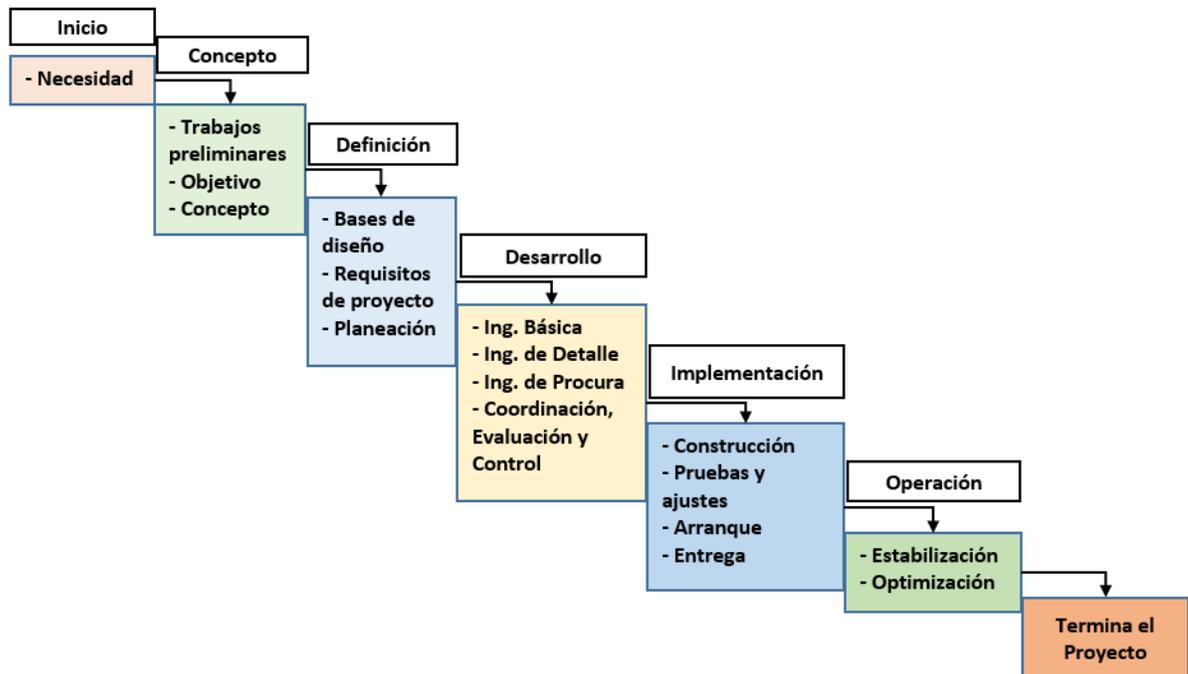
Con la finalidad de ahorrar recursos monetarios (gasto en combustible) durante el calentamiento del agua para un ciclo de potencia de vapor, es posible aprovechar la energía contenida en los gases de combustión de la turbina de gas. El resultado es un ciclo combinado de gas y vapor.

### **3.6 Análisis de ciclos de potencia (vapor y gas) con base en la segunda ley**

Un análisis termodinámico de cualquier proceso existente tiene como objetivo saber la eficiencia del mismo, es decir, qué tan bien se están aprovechando los recursos suministrados para la obtención del producto final. En el caso de este trabajo es una propuesta de diseño y análisis preliminar, un análisis que pertenece, en caso de ser llevado a cabo el proyecto, a la

ingeniería conceptual de una planta de ciclo combinado con gasificación integrada, conocida en el medio como IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle), es decir, que de acuerdo con la Figura 23, este trabajo quedaría en la segunda etapa (Concepto) de un proyecto por lo que para ser terminado se deben efectuar las etapas consecuentes.

Figura 23 Fases de un proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Los estudiosos de los ciclos de potencia saben que la preservación de los recursos es parte fundamental de una buena propuesta de diseño. En este punto una de las preguntas obvias sería ¿Cuáles son los criterios para saber si se está realizando una buena propuesta? ¿Por qué un análisis con base en la segunda ley de la termodinámica?

El ser humano siempre está intentando obtener un beneficio, ya sea cubrir una necesidad o tener mayor confort, a partir de materias primas como alimentos o combustibles fósiles y biocombustibles recientemente, debido a que éstos son recursos energéticos. Para entender cómo es esto posible, no hay otra forma que conocer y entender las Leyes de la termodinámica. Dichas leyes ayudan a comprender porqué la energía fluye en cierta dirección y de cierta forma.

Muchos de los conceptos descritos por la termodinámica parecen ser descritos por el sentido común, sin embargo, existe un trasfondo matemático debajo del nivel intuitivo que hace de estos conceptos herramientas poderosas para describir ciertos sistemas.

Las leyes de la termodinámica son cuatro, que en su forma conceptual más básica son establecidas de la siguiente forma:

**Ley cero:** Define a la temperatura mediante el equilibrio térmico y nos permite establecer a la temperatura como una propiedad de la materia universal y medible.

**Primera Ley:** Define a la energía y su conservación (la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma).

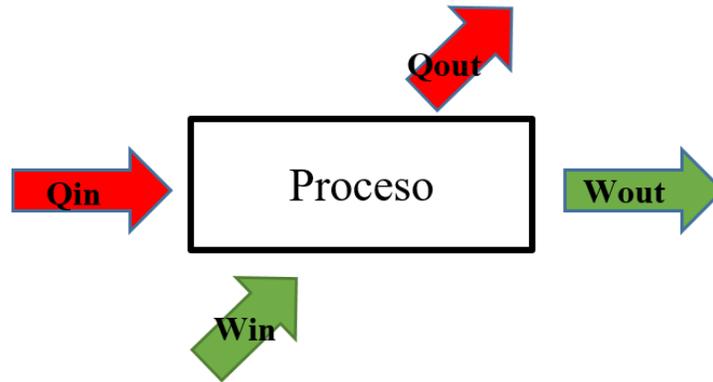
**Segunda Ley:** Define a la entropía y su crecimiento constante.

**Tercera Ley:** Establece que la entropía de un cristal perfecto es igual a cero cuando la temperatura absoluta a la que se encuentra es cero (Solamente existirá un orden completo cuando las moléculas no tengan movimiento).

Cada una de las leyes de la termodinámica puede ser vista como una forma de definir una propiedad específica de un sistema dado: la energía interna es definida mediante la primera ley y la entropía es definida mediante la segunda ley. En este sentido y como ya se mencionó, la ley cero define una propiedad termodinámica llamada temperatura (Bejan, 2016).

Las herramientas principales para llevar a cabo el análisis termodinámico del sistema propuesto en este trabajo son la primera y la segunda leyes. Éstas son complementarias ya que la primera ley no distingue entre calor transferido y trabajo transferido como dos formas posibles de interacción energética, ver Figura 24, entre un sistema y el medio que lo rodea, como se puede apreciar en la **Ecuación Fundamental de la Primera Ley** (ecuación 3).

Figura 24 Esquema de un ciclo de potencia.



Fuente: Elaboración propia.

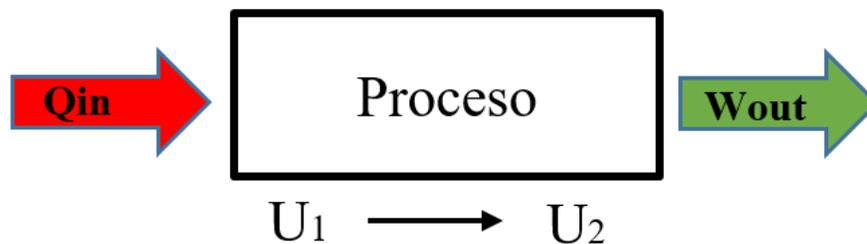
Planteando el balance de energía con base en el esquema anterior:

Ecuación 7 
$$Q_{in} + W_{in} = Q_{out} + W_{out}$$

Ecuación 8 
$$\therefore \sum_{i=1}^n \dot{E}_{in} = \sum_{i=1}^n \dot{E}_{out}$$

De la Ecuación 8 se puede obtener el siguiente diagrama, en donde la energía interna (U) del proceso varía con respecto al tiempo,  $U_2 > U_1$ , ver Figura 25.

Figura 25 Variación de la energía interna de un sistema.



Fuente: Elaboración propia.

**Ecuación fundamental de Primera Ley:**

Ecuación 9 
$$dU = \delta Q - \delta W$$

Esta limitación de la primera ley permite que el flujo energético sea bidireccional (es decir, no restringe que exista una transferencia de energía en sentido menor temperatura a mayor temperatura), siempre y cuando la conservación de ésta se mantenga.

Además, esta ecuación no tiene contemplada la calidad de la energía suministrada, es decir, para el esquema de la Figura 24, el calor  $Q_{in}$  puede ser energía eléctrica, cuyo aumento de entropía es muy bajo debido a que es una energía ordenada, o un combustible, un tipo de energía desordenada.

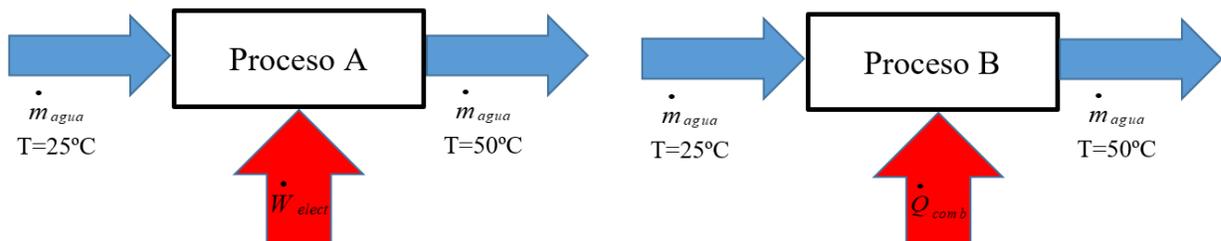
Lo anterior puede ser demostrado con el siguiente ejemplo:

Al plantear las ecuaciones de balance de energía (primera ley) para ambos procesos (A y B), de la Figura 26, en los que se alimenta agua a 25 °C y se obtiene un efluente a 50 °C se obtiene lo siguiente:

$$\text{Proceso A: } m_1 h_1 + \dot{W}_{elect} = m_2 h_2$$

$$\text{Proceso B: } m_1 h_1 + \dot{Q} = m_2 h_2$$

Figura 26 Diagrama de calentamiento de agua con A) Energía eléctrica y B) Combustible.



Fuente: Elaboración propia

nos podemos dar cuenta que, para el balance energético  $\dot{Q} = \dot{W}_{elect}$ .

Sin embargo, al plantear el balance de entropía para ambos procesos, se obtiene lo siguiente:

### Ecuación fundamental de Segunda Ley:

$$\text{Ecuación 10} \quad \dot{S}_{generada} = \sum \dot{S}_{final} - \sum \dot{S}_{inicial}$$

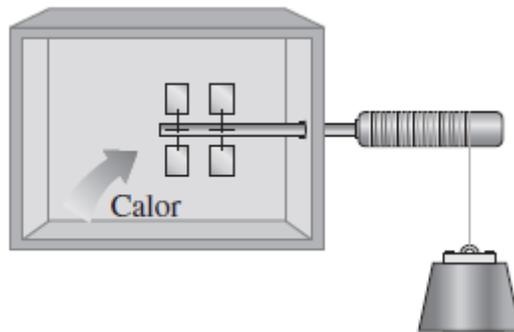
$$\text{Proceso A: } S_{generada} = m_2 s_2 - m_1 s_1$$

$$\text{Proceso B: } S_{generada} = m_2 s_2 - m_1 s_1 - \frac{Q}{T_{fuente}}$$

De las ecuaciones anteriores se determina que  $\dot{Q} \neq \dot{W}_{elect}$

Otro ejemplo de lo antes mencionado es un mecanismo provisto de una rueda de paletas que funciona mediante la caída de una masa, ver Figura 27; la rueda gira cuando desciende la masa y agita un fluido dentro de un recipiente aislado. Como resultado disminuye la energía potencial de la masa mientras que la energía interna del fluido se incrementa de acuerdo con el principio de conservación de la energía.

*Figura 27 Transferir calor a una rueda de paletas no hará que ésta gire.*



Fuente: Termodinámica, Yunus A. Cengel, 2012.

Sin embargo, el proceso inverso de subir la masa mediante transferencia de calor desde el fluido a la rueda de paletas no ocurre en la naturaleza, aunque hacerlo no violaría la primera ley de la termodinámica (Cengel, 2012).

A partir de estos argumentos, resulta claro que los procesos van en cierta dirección y no en la dirección contraria, ver Figura 27. La primera ley de la termodinámica no restringe la dirección de un proceso, pero satisfacerla no asegura que en realidad ocurra el proceso. Esta falta de adecuación de la primera ley para identificar si un proceso puede tener lugar se remedia introduciendo otro principio general, la segunda ley de la termodinámica.

*Figura 28 Los procesos ocurren en cierta dirección.*



Fuente: Elaboración propia.

Aunque el principal uso de la segunda ley es identificar la dirección de un proceso, ésta también afirma que la energía tiene cantidad y calidad. Además, la segunda ley de la termodinámica provee los medios necesarios para determinar el grado de degradación que sufre la energía durante un proceso (Cengel, 2012). Esta característica es de particular interés para el trabajo desarrollado y presentado en este documento ya que nos permite saber en qué parte del proceso existen mayores irreversibilidades.

El sentido de los procesos, del que se habla en el párrafo anterior, es aquel que va de un estado en donde la energía está acumulada a un estado donde ésta se encuentra mayormente dispersa, es decir, un estado de mayor entropía. Como es establecido por la segunda ley de la termodinámica, la entropía de un sistema siempre es mayor después de un proceso real. Los procesos que no aumentan la entropía del universo requieren que se realice un trabajo en oposición a la dispersión energética y son, de hecho, imposibles de llevar a cabo.

Queda claro entonces que para que un proceso suceda en la naturaleza debe cumplir con la primera y segunda leyes de la termodinámica.

La energía sólo es útil cuando se encuentra agrupada. En el momento en que se dispone de ella está siendo dispersada y una vez dispersa no se puede usar más, es decir, la exergía es destruida.

Ya que los residuos sólidos urbanos, como materia prima del proceso aquí expuesto, son una fuente de energía agrupada debido a su composición, el llevar a cabo un análisis exergético del sistema nos permite saber la cantidad de trabajo mecánico teórico que puede ser obtenido de éstos y posteriormente la cantidad de potencia eléctrica obtenida a partir de dicho trabajo, así como la exergía destruida en el proceso. Además, realizar un análisis exergético de un Ciclo Combinado

con Gasificación Integrada en la etapa conceptual del proyecto permite manipular la configuración del sistema analizado y con base en los resultados obtenidos mediante éste se puede tomar una decisión para continuar con el proyecto según la configuración elegida.

A continuación, se presenta el caso base del sistema propuesto. Un IGCC que conceptualmente destinará todos los recursos utilizados para la generación de potencia eléctrica, así como una variación de este mismo, en donde además de energía eléctrica se destina parte de una línea de vapor a un sistema de refrigeración por absorción.

## Capítulo 4

### Análisis del sistema.

La generación de potencia mecánica es la verdadera *raison d'être*<sup>3</sup> de la termodinámica. El mundo ha recorrido un largo camino desde las primeras máquinas de vapor y máquinas reciprocantes que iniciaron este campo de estudio (Bejan, 2016). Para generar el vapor de estas máquinas se han quemado distintos combustibles tales como carbón, gas natural y petróleo. El uso de estos combustibles como principal fuente de energía para ciclos de generación de potencia eléctrica no tiene futuro prometedor ya que el incremento de la población mundial representará un desabasto de las reservas naturales.

A continuación, se describe un sistema de Ciclo Combinado con Gasificación Integrada, que es un sistema que se olvida del uso de combustibles fósiles y minerales como fuente principal de energía y que usa parte de los residuos sólidos urbanos de una de las ciudades más grandes del mundo, la Ciudad de México.

La planta es una planta modular con capacidad de 16 ton/h compuesta de tres secciones que en adelante se llamarán islas. Las islas que componen este proceso son: Isla de Gasificación, Isla de Integración Energética e Isla de Potencia.

#### 4.1 Isla de gasificación.

En esta primera etapa la materia prima es almacenada y alimentada al gasificador que entregará syngas por el domo y escoria o slag, que son minerales, y metales fundidos, en la parte inferior. Esta isla está conformada por los equipos de la Tabla 8. El proceso es descrito a continuación.

Tabla 8 Lista de equipos. Isla de gasificación.

Equipo	Tag
Gasificador	GA-01
Compresor	CG-O2
Bandas transportadoras	---
Tolvas	---

Fuente: Elaboración propia.

<sup>3</sup> Traducción: Razón de ser

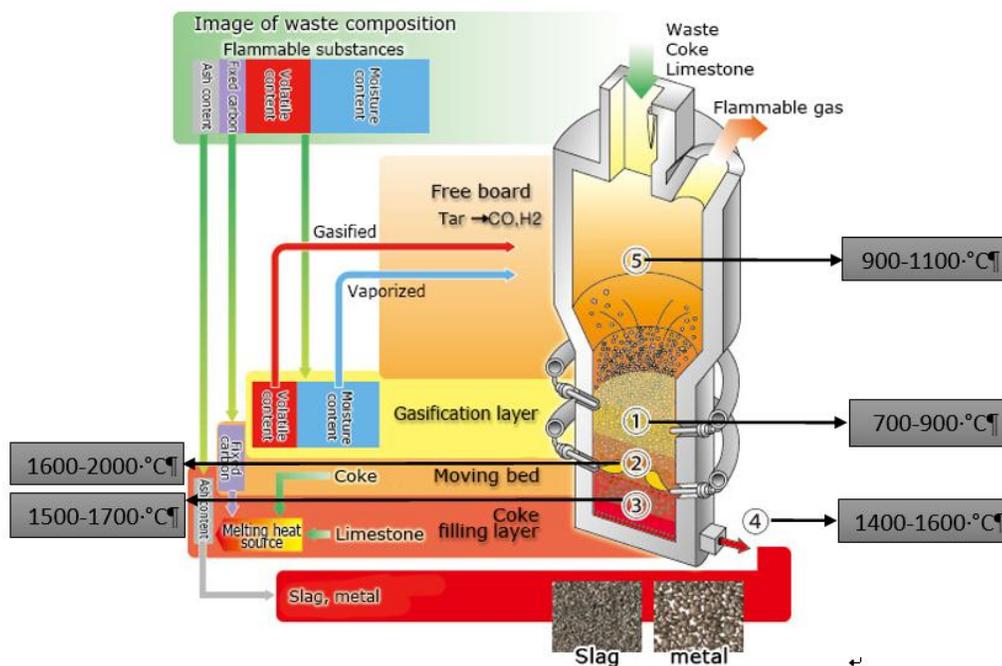


Los lotes de residuos, el coque y la caliza se colocarán sobre cintas transportadoras, que llevarán la materia prima a una tolva acoplada al reactor de gasificación. Una vez que la tolva está llena, se abrirá una válvula de compuerta que permitirá al material entrar a la cúpula. El diseño incluye un sistema de tolva doble con el fin de que mientras una tolva está alimentando al reactor, una segunda tolva esté llenándose, lo anterior con la finalidad de que la producción de syngas sea de forma continua.

### Reactor de gasificación

El reactor de gasificación por plasma utilizado por JFE Engineering Corporation consiste en un equipo de eje vertical protegido interiormente por material refractario para soportar las altas temperaturas del proceso y las condiciones corrosivas de operación, ver Figura 30.

Figura 30 Corte transversal del gasificador.



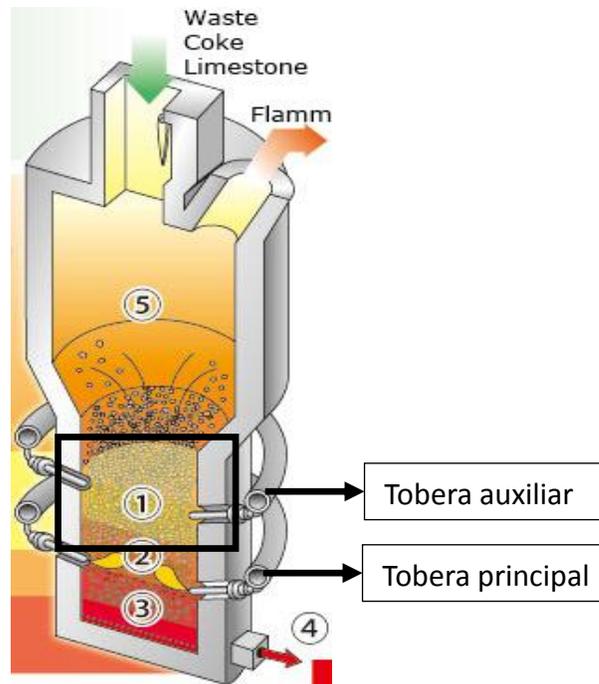
Fuente: JFE Engineering, 2019.

### Capa de gasificación (gasification layer) 1

Los RSU, el coque y la caliza caen desde la parte superior del reactor hasta la parte superior de la capa de deposición cercana a la tobera auxiliar, ver Figura 31, mientras que el calor que asciende desde la capa inferior mantiene la atmósfera entre 700 y 900 °C. Los residuos son secados y descompuestos térmicamente (gasificados). La reacción de gasificación convierte los

componentes orgánicos de los residuos en gas de síntesis que abandona el reactor por la parte superior. La composición del syngas obtenido depende mucho de la composición de los residuos que son alimentados, así como del coque metalúrgico utilizado. En la Tabla 9 se muestra la composición de residuos sólidos urbanos en general de la Ciudad de México.

*Figura 31 Capa de gasificación dentro del gasificador.*



Fuente: JFE Engineering Corporation, 2019.

El principal componente de la basura es carbón en un rango de 50.4% a 75.5%. El componente con la menor proporción es azufre con 0.2% (% peso, base seca), presente en la delegación Iztapalapa. La composición química de los RSU de la Ciudad de México es: **C-61.2%, H-15.4%, N-2.92%, S-0.02%, O-7.45% y Ceniza-13.0%**; resultando en la siguiente fórmula por fracción volátil:  $C_{7,125} H_{22,066} O_{938} N_{309} S$  (Durán-Moreno, 2013).

Sin embargo, aun contando con la composición general de los residuos de la Ciudad de México, una composición más específica fue utilizada. Ésta es la composición encontrada para la Planta Compactadora Iztapalapa 2 dentro de la Central de Abasto, que es la locación pensada originalmente para implementar el ciclo combinado, principalmente por la facilidad con la que se obtiene la materia prima.

*Tabla 9 Composición física de los RSU de la Ciudad de México.*

Categoría	Composición Masa [%]
Plásticos	13.16
Textiles	3.64
Orgánicos	49.5
Residuos Sanitarios	10.77
Papel	5.89
Cartón	4.03
Material de construcción	1.88
Materiales Ferrosos	1.16
Madera	0.45
Finos	0.8
Aluminio	0.29
Vidrio	2.65
Residuos Especiales	1.41
Residuos Peligrosos	0.18
Otros	4.19

Fuente: Duran, 2013.

La composición de los residuos obtenidos de la Planta Compactadora Iztapalapa 2 puede ser vista en la Tabla 10, así como la composición del coque metalúrgico en la Tabla 11.

*Tabla 10 Composición de la basura en la delegación Iztapalapa.*

Componente	Concentración
C	% 64.3
H <sub>2</sub>	% 19.7
O <sub>2</sub>	% 0.6
N <sub>2</sub>	% 4
S	% 0.2

Fuente: Duran, 2013.

*Tabla 11 Composición del coque metalúrgico.*

Componente	Concentración
C	%(db) 85
H <sub>2</sub>	%(db) 0.54
O <sub>2</sub>	%(db) 12.46
N <sub>2</sub>	%(db) 1.28
S	%(db) 0.72

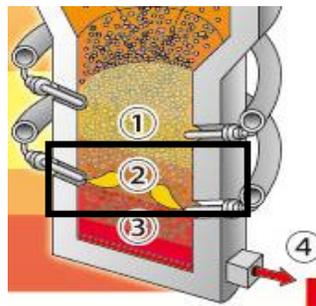
Fuente: Lomas, 2017.

El gas de síntesis que abandona el reactor lo hace a temperaturas entre los 890 °C y 1100 °C a presión cercana a la atmosférica. Una vez fuera del reactor pasará por diferentes procesos de enfriamiento.

### Cama móvil (moving bed) 2

La ceniza y otros compuestos descienden desde la capa de gasificación a la cama móvil junto con el coque metalúrgico y la caliza. En esta etapa se alimenta oxígeno a través de la tobera principal, ver Figura 32, además, es aquí donde se alcanzan los rangos de temperatura más altos, entre 1600 y 2000 °C mediante la combustión del coque y del carbón fijo de los residuos, fundiendo completamente la ceniza. La caliza funciona como habilitador para que el efluente de los fondos del gasificador fluya sin problemas.

*Figura 32 Cama móvil.*

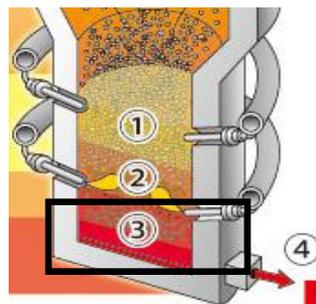


Fuente: JFE Engineering Corporation, 2019.

### Capa de relleno de coque (coke filling layer) 3

Debajo de la tobera principal hay una capa formada por coque que está caliente pero no se ha quemado completamente, ver Figura 33.

*Figura 33 Capa de relleno de coque.*



Fuente: JFE Engineering Corporation, 2019.

La escoria y el metal gotean a través de esta capa a aproximadamente 1,500 a 1,700 °C La escoria y el metal se funden y homogeneizan completamente antes de que alcancen el fondo del reactor.

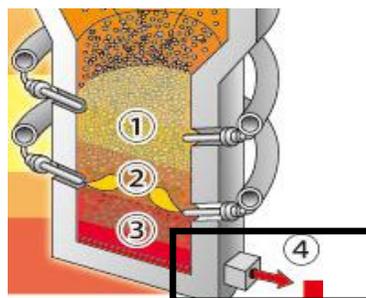
La función del coque es la de absorber y retener la energía en forma de calor que se produce en las antorchas de plasma y así proporcionar un esqueleto que soporta la carga de la alimentación de los residuos en su descenso a través del reactor de gasificación, y su conversión a ceniza líquida y syngas. Este proceso es similar al que se produce en un horno común de incineración. El coque metalúrgico se introduce a la vez que los residuos y es vital para la operación que se realiza en el gasificador. Una segunda función del mismo es reducir la velocidad a la que el gas sale de las antorchas de plasma para conseguir una distribución correcta del calor en la cámara del reactor.

La base de coque comenzará a gasificar poco a poco, pero permanecerá al fondo de la mezcla, manteniendo los residuos por encima. Los únicos materiales que escapan de la base de coque son la escoria y metales derretidos, siendo ambos recuperados al final del proceso. El slag derretido es una mezcla no combustible e inerte de inorgánicos y metales recuperables que será enviado al sistema de control de slag para ser procesado. Los metales son separados del slag en un último proceso de separación rápida.

Salida de slag (slag outlet) 4

La escoria (slag) y los componentes metálicos derretidos se descargan continuamente, por un conducto recubierto de material refractario, ver Figura 34, salida que se encuentra en la base del horno, a 1650 °C.

*Figura 34 Salida de slag.*



Fuente: JFE Engineering Corporation, 2019.

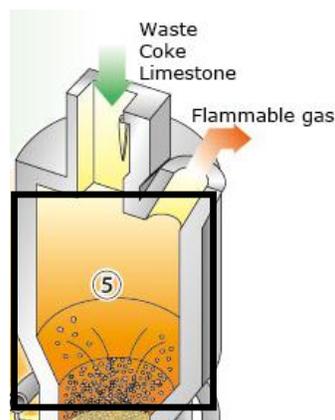
Estos materiales deben ser granulados por lo que llegan a una tina granuladora que los enfría y moldea rápidamente.

#### Free board 5

El gas producido asciende a la sección “free board”, ver Figura 35, en donde completa el proceso de conversión. La generación de sustancias nocivas es inhibida a través de esta sección gracias a una atmósfera reductora que se encuentra entre 800 y 950 °C.

El gas obtenido por los residuos es entonces utilizado en el ciclo Brayton en la isla de ciclo combinado (generación de potencia eléctrica).

*Figura 35 Free board.*



Fuente: JFE Engineering Corporation, 2019.

#### Gas de síntesis (Flammable gas)

El gas de síntesis o syngas, cuya composición se muestra en la Tabla 12, que abandona el reactor por la parte superior a 1100 °C y 101.325 kPa, contendrá ceniza que es recuperada en el tren de generación de vapor, que es la segunda isla que compone esta planta.

*Tabla 12 Composición del syngas obtenido a partir de RSU.*

Componente		Concentración
H <sub>2</sub>	%	30.7
CO	%	32.5
CO <sub>2</sub>	%	33.8
N <sub>2</sub>	%	3
Dioxinas	(ng-TEQ/m <sup>3</sup> )	0.00039
Dioxinas	(O <sub>2</sub> :12% conversión)(ngTEQ/m <sup>3</sup> )	0.00009

Fuente: Yamada, 2004.

## 4.2 Isla de Integración energética.

La isla de integración energética está compuesta de dos secciones que pueden ser observadas en la Figura 36. La primera sección está compuesta por los equipos listados en la Tabla 13.

Inmediatamente después de que el syngas abandona el gasificador, a 1100 °C por la parte superior de éste, es enfriado bruscamente en el IC-01 hasta 200 °C con la corriente de agua proveniente del IC-02 que se encuentra a 180 °C. Este proceso evita la formación de dioxinas y furanos. El vapor generado en el equipo IC-01 que se encuentra a 225 °C y 1550 kPa, y que es poco comparado con la cantidad requerida para mover la turbina, se destina al gasificador para favorecer la conversión de la biomasa contenida en los residuos en gas de síntesis. Además, el vapor de agua favorece la oxidación del carbón enriqueciendo al syngas de hidrógeno como se muestra en la siguiente reacción:

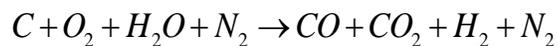
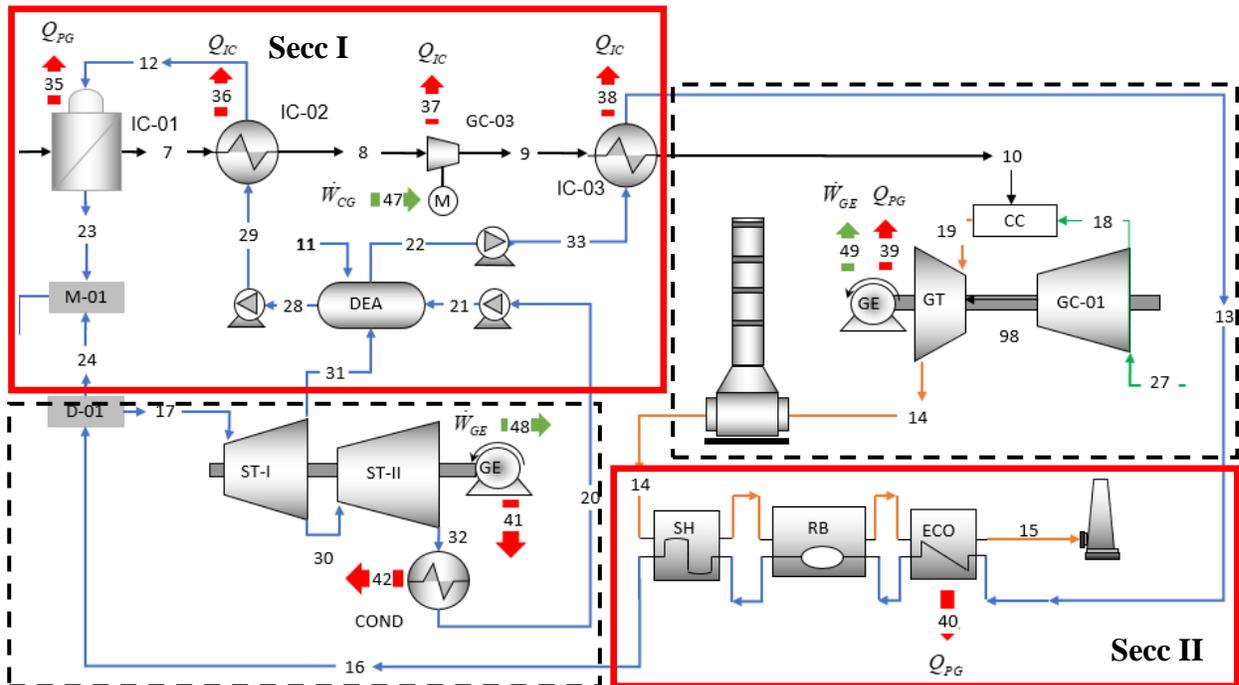


Figura 36 Isla de Integración energética.



Fuente: Elaboración propia.

El syngas entra después a un condensador (IC-02) con la finalidad de disminuir su temperatura hasta 25 °C y poder ser impulsado por el compresor GC-03 para poder ser alimentado a la turbina

de gas. Las condiciones del syngas a la salida del compresor son 500 °C y 2400 kPa. Con esta temperatura, la energía requerida por el compresor de la turbina se incrementa, por lo que el gas de síntesis debe ser enfriado. Este enfriamiento se realiza en el IC-03 con una línea de agua (28) proveniente del Deareador (DEA) que se encuentra a 134 °C y 10 000 kPa. Es a estas condiciones que el gas es alimentado a la cámara de combustión de la turbina de gas.

*Tabla 13 Lista de equipos, Sección I, Isla de Integración Energética.*

Equipo	Tag
Generador de vapor	IC-01
Precalentador	IC-02
Compresor de syngas	GC-03
Precalentador	IC-03
Deareador	DEA
Mezclador	M-01

Fuente: Elaboración propia.

La segunda sección se trata del equipo encargado de generar el vapor que es utilizado posteriormente en el ciclo Rankine. Esto sucede ya que el equipo HRSG (Heat-Recovery-Steam-Generator) utiliza y aprovecha la energía térmica contenida en los gases generados de la combustión de la turbina de gas, para después ser liberados a la atmósfera a 130 °C.

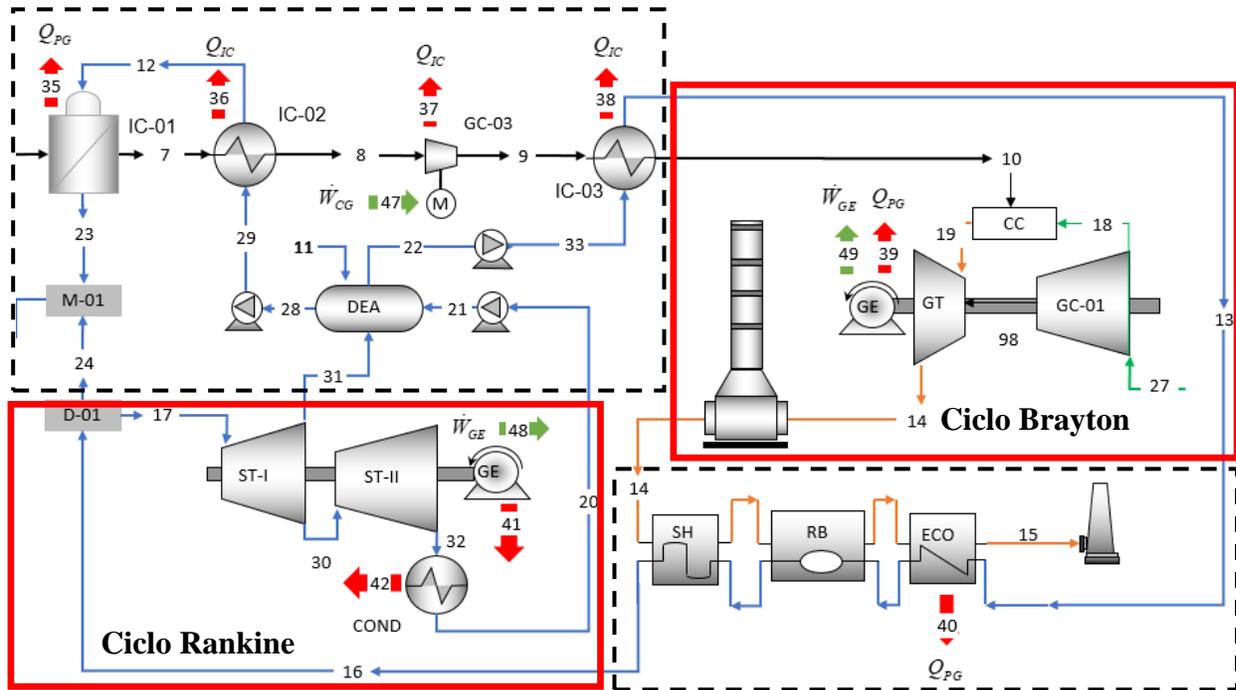
### **4.3 Isla de Potencia Eléctrica.**

El objetivo de este proceso es generar energía eléctrica mediante un ciclo combinado, es decir, utilizando una Turbina de Gas (Ciclo Brayton) y una Turbina de Vapor (Ciclo Rankine) como se muestra en la Figura 37. Los equipos que conforman cada uno de los ciclos son listados en las Tablas 14 y 15 respectivamente.

La Turbina de Gas del Ciclo Brayton consume los 3.34 kg/s del gas proveniente de la isla de gasificación quemándolos junto con 61.35 kg/s de aire atmosférico alimentados con el compresor GC-01 por la línea 18 a 327.3 °C y 770 kPa. Al salir de la cámara de combustión (CC) los gases de combustión se encuentran a 887 °C y 101.325 kPa. Son éstos los que, mediante el trabajo mecánico realizado por su expansión, activan la rotación de la turbina de gas (TG) para generar 13.38 MW de potencia eléctrica, gracias al generador acoplado a ella.

Los gases de la combustión que se encuentran a 421 °C y presión atmosférica, a la salida de la TG, son entonces enviados al HRSG donde la energía térmica será transferida a una corriente de agua proveniente del Deareador y generar vapor para el ciclo Rankine, formando así el ciclo combinado.

Figura 37 Isla de Ciclo Combinado (generación de potencia eléctrica).



Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Lista de equipos, Ciclo Brayton.

Equipo	Tag
Cámara de combustión	CC-01
Compresor de aire	GC-01
Turbina de Gas	GT-01
Generador de energía eléctrica	GE-GT
Deareador	DEA

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15 Lista de equipos, Ciclo Rankine.

Equipo	Tag
Turbina de vapor I	ST-I
Turbina de vapor II	ST-II
Condensador	COND
Generador de energía eléctrica	GE-ST
Deareador	DEA

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los gases de combustión exhaustos son enviados a la atmósfera a 130 °C y presión atmosférica.

El ciclo Rankine cuenta con una turbina que utiliza 6.7 kg/s del vapor generado en el HRSG a 10 000 kPa y 500 °C. Sin embargo, esta no es la totalidad del vapor proveniente de la isla anterior

ya que 0.09 kg/s son enviados al mezclador M-01 al que también llegan 1.96 kg/s, a 225 °C y 1550 kPa, de vapor generado en IC-01 dando un total de 2.05 kg/s de vapor a 235 °C y 1600 kPa, que es la cantidad destinada al gasificador para la conversión de los residuos sólidos y el enriquecimiento de hidrógeno del syngas.

La turbina utilizada en esta etapa del proceso, acoplada a un generador de energía eléctrica, incorpora una sección de descarga de vapor a alta presión (salida de la ST-I) y una descarga de vapor a baja presión (salida de ST-II), ambas líneas de descarga llegan al Deareador (DEA), en donde se completa el ciclo del fluido de trabajo, agua. Bajo las condiciones de operación ya mencionadas, este sistema es capaz de producir 6.75 MW.

La capacidad total de generación de la planta, en esta primera configuración (caso base), es de 20.129 MW.

#### **4.4 Evaluación del sistema.**

La definición del sistema estudiado es el primer paso de este tipo de análisis para después conocer la capacidad de producir trabajo útil de cada flujo energético, involucrado en el proceso, a partir de un ambiente de referencia.

Mencionado lo anterior, la planta ha sido definida como un ciclo de potencia (combinado) cerrado, lo cual quiere decir que no hay intercambio másico con el entorno que lo rodea, así el primer paso para llevar a cabo este tipo de estudios es definir el ambiente de referencia o estado muerto, es decir, se establecen las variables presión (P) y temperatura (T) pertenecientes a dicho estado con el que interactuará el sistema. Lo que sigue es calcular las propiedades termodinámicas (estados termodinámicos), es decir, entalpía y entropía de este ambiente.

Esta planta emite energía calorífica al aire atmosférico por lo que las propiedades entalpía y entropía específicas de éste deben ser calculadas a P y T establecidas, 101.325 kPa y 25 °C (ambiente de referencia). Además, este proceso utiliza dos fluidos de trabajo que son: gas de síntesis y vapor de agua, para los que también han sido calculadas entalpía y entropía de referencia (@ 101.325 kPa y 25 °C), mostrados en el Anexo I.

Los estados termodinámicos de los flujos másicos son calculados a las condiciones de diseño de acuerdo a los flujos másicos calculados mediante reacción química como es el caso de la

corriente teórica de gas de síntesis obtenida a la salida del gasificador o por balances de masa y energía realizados.

La exergía de una cantidad de materia es igual al trabajo útil máximo que puede obtenerse cuando se lleva desde su estado original al de equilibrio termodinámico con el ambiente, sin más intervención que la interacción de éste con sus alrededores. Dicho estado final de equilibrio se llama “estado muerto”. Desde otra perspectiva, la exergía puede ser considerada como una medida del desequilibrio existente entre la materia considerada y el ambiente de referencia. Esta propiedad aumenta al alejarse de las condiciones del equilibrio con el ambiente (Montes, 2009).

De acuerdo con la Segunda Ley de la Termodinámica, todo proceso real provoca la generación de entropía, que es medible al realizar un balance entrópico. Al realizar un balance exergético, resulta que, para todo proceso real, se produce una destrucción de exergía, en correspondencia con la generación de entropía.

El análisis exergético permite localizar las irreversibilidades, discernir sus causas y cuantificarlas mediante las destrucciones de exergía, tanto física como química, que originan.

A continuación, se presenta un diagrama de bloques para facilitar la comprensión del IGCC:

### Descripción

1 Almacenamiento: Los residuos recibidos por la planta serán almacenados temporalmente en un almacén cubierto de cemento

2 El coque y la caliza serán enviados a una tolva que dosificará las cantidades necesarias de ambos componentes a las bandas transportadoras

3 Los lotes de residuos, el coque y la caliza se colocarán sobre cintas transportadoras, que llevarán la materia prima a una tolva acoplada al reactor de gasificación. Una vez que la tolva está llena, se abrirá una válvula que permitirá al material entrar a la cúpula.

4 Reactor de gasificación: Las reacciones de gasificación convertirán los componentes orgánicos de los residuos en un gas de síntesis que abandona el reactor por la parte superior, mientras que los componentes inorgánicos se convertirán en ceniza “slag” derretida que sale del reactor por la parte inferior.

5 El reactor opera a temperaturas muy altas en su parte inferior, así que se inyectará tanto aire como vapor durante el proceso.

6 Cambiador de calor: El syngas caliente que sale del reactor pasa inmediatamente a un enfriamiento brusco que evita la formación de dioxinas y furanos. Se pretende que la temperatura del syngas pase de 1100 °C a 200 °C con el intercambio de calor con una corriente de agua precalentada

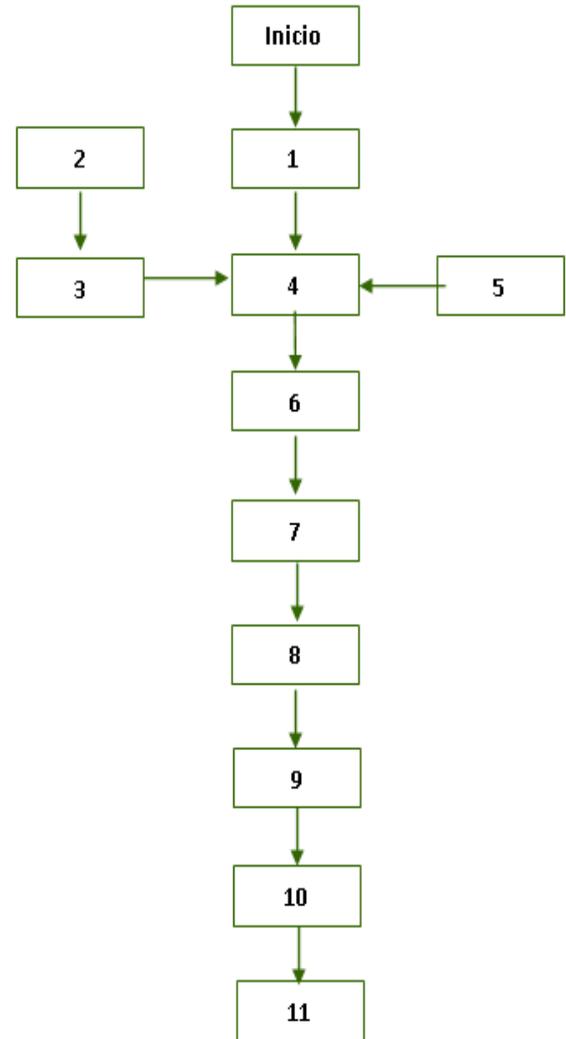
7 Condensador: Aquí el syngas entra a este condensador a una Temperatura de 120 °C, debido a las pérdidas de calor en tubería, intercambia calor con una corriente de agua a 25 °C, proveniente de la torre de enfriamiento.

8 Para su uso en la turbina de gas, el syngas se comprime a 2400 kPa.

9 Enfriador: El objetivo de este enfriamiento es mejorar la eficiencia de la turbina de gas.

10 Turbina: se alimenta aire y sin gas a la cámara de combustión para generar trabajo mecánico y posteriormente trabajo eléctrico.

11 Se genera corriente alterna a partir de la mecánica mediante la rotación del embobinado del generador





El diagrama de la planta IGCC que se muestra en la Figura 38 fue evaluado mediante la mediante el cálculo de la irreversibilidad correspondiente a cada una de las operaciones unitarias, así como de las corrientes involucradas en el proceso, ver Tabla 16.

*Tabla 16 Identificación de corrientes.*

# de corriente	Especie	# de corriente	Especie
1	RSU	18	Aire
2	Coque+Caliza	19	Gases Combustión
3	Coque+Caliza+RSU	20	Agua
4	Oxígeno	21	Agua
5	Syngas	22	Potencia
6	Esco/Metal	23	Vapor
7	Syngas	24	Vapor
8	Syngas	25	Vapor
9	Syngas	26	Agua
10	Syngas	27	Aire
11	Agua	28	Agua
12	Agua	29	Agua
13	Agua	30	Vapor
14	Gases Combustión	31	Vapor
15	Gases Combustión	32	Vapor
16	Vapor	33	Agua
17	Vapor		

Fuente: Elaboración propia.

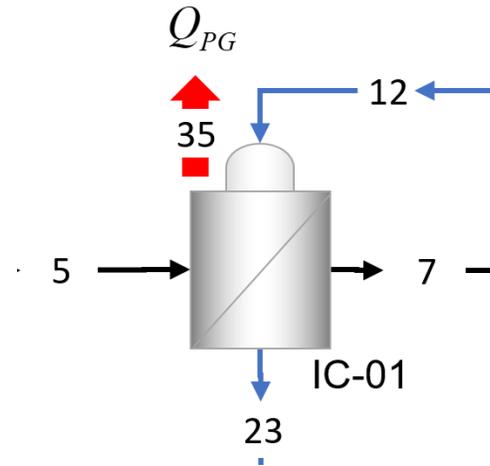
#### Balance energético

El análisis debe ser desarrollado de forma progresiva empezando por realizar un balance energético, es decir, calculando las entalpías de las corrientes para proceder con el balance en cada una de las operaciones unitarias. Como ejemplo, para el IC-01, ver Figura 39, el balance energético estará escrito de la siguiente forma:

$$\dot{H}_5 + \dot{H}_{12} - \dot{H}_{23} - \dot{H}_7 - \dot{Q}_{35} = 0$$

donde  $\dot{H}_j = \dot{m}_j h_j$  y  $\dot{Q}_{35} = \dot{Q}_{cedido} - \dot{Q}_{ganado}$ , ambas ecuaciones teniendo como unidades energía/tiempo o potencia.

Figura 39 Intercambiador de calor IC-01.



Fuente: Elaboración propia.

### Balance exergético

Para poder realizar el balance exergético es necesario definir las condiciones del estado de referencia que en este caso son  $T = 25\text{ °C}$  y  $P = 101.325\text{ kPa}$ . Habiendo definido el ambiente de referencia, es posible realizar un balance de entropía para cada una de las corrientes, y para el cálculo de esta propiedad fueron usadas las ecuaciones siguientes:

$$\text{Ecuación 11} \quad s_0 - s_{00} = Cp \ln \left( \frac{T_0}{T_{00}} \right)$$

para corrientes que no son gases y

$$\text{Ecuación 12} \quad s_0 - s_{00} = Cp \ln \left( \frac{T_0}{T_{00}} \right) - R \ln \left( \frac{P_0}{P_{00}} \right)$$

para las corrientes que se encuentran en estado gaseoso.

Después de realizar el balance de entropía de las corrientes ahora se puede calcular la exergía física, química y de calor. Para lo anterior se utilizaron las ecuaciones siguientes:

Ecuación 13      **Exergía de flujo de calor**  $b_q = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right)$

Ecuación 14      **Exergía física**  $b_f = \sum_{i=T}^n m_T (h_T - h_0) - T_0 (s_T - s_0)$

Ecuación 15      **Exergía química**  $\frac{b_{quim}}{PCI} = \left( 1.033 + 0.0169 \left( \frac{\beta}{\alpha} \right) \right) - \left( \frac{0.0698}{\alpha} \right) \%$

La función  $b$  (exergía) es una función de estado intensiva y tiene las dimensiones de energía/masa. Si el flujo másico de la corriente es  $\dot{m}$ , el flujo exergético será

$$\dot{B} = \dot{m} b$$

con las dimensiones de energía/tiempo, o potencia, de cada corriente y/o equipo (operación unitaria) (Montes, 2009). El balance global de destrucción está dado por la ecuación

$$B_d = \sum_{i=1}^n B_i^{in} - \sum_{i=1}^n B_i^{out}$$

Por lo tanto, el balance exergético para el intercambiador IC-01 es

$$\dot{B}_d = \dot{B}_5 + \dot{B}_{12} - \dot{B}_{23} - \dot{B}_7$$

en esta ecuación  $\dot{B}_d$  representa la exergía destruida en el equipo.

Además de permitirnos determinar y evaluar numéricamente las causas de la ineficiencia de una planta y de sus equipos, esta herramienta también nos permite distribuir la irreversibilidad total entre ellos.

La eficiencia exergética de ambas configuraciones, ciclo combinado y cogeneración, es calculada en general con la ecuación siguiente:

Ecuación 16       $\eta_{exe} = \frac{\sum B_{salida}}{\sum B_{entrada}}$

Siendo  $\eta_{exe} = \frac{B_Q + B_W}{B_{RSU} + B_{H_2O}}$  la ecuación específica de nuestro sistema.

## 4.5 Cogeneración

La cogeneración es la producción secuencial termodinámica de dos o más formas útiles de energía a partir de una fuente primaria de energía.

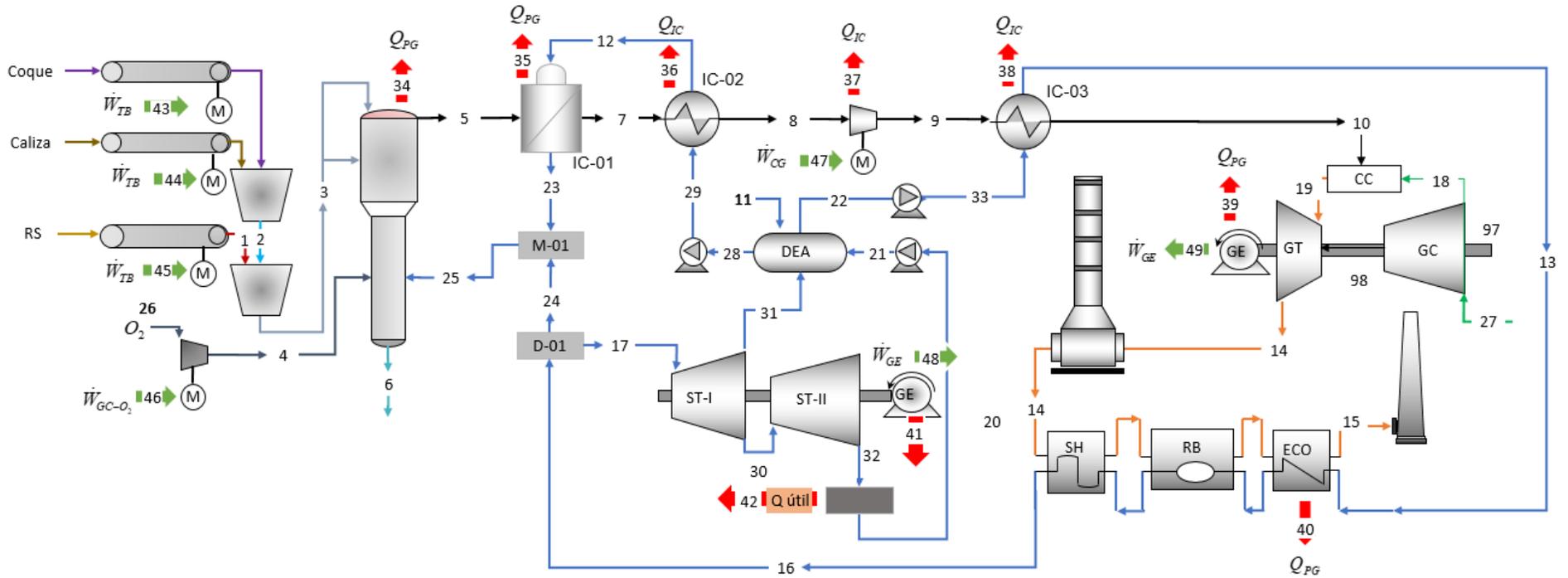
Las dos formas más útiles de energía son la mecánica y la térmica. La energía mecánica es utilizada para mover generadores eléctricos. Por lo que la siguiente definición de “cogeneración”, aunque un poco restrictiva, aparece normalmente en la literatura:

*La cogeneración es la producción simultánea de energía eléctrica (o mecánica) y energía térmica útil a partir de la misma fuente primaria de energía.*

De manera homóloga se realizó el análisis para la segunda configuración del sistema propuesto, ver Figura 40, que incorpora una variación en el uso del vapor generado en la Isla de Integración Energética. En el primer caso, la totalidad del vapor generado en dicha isla tiene únicamente dos usos que son: generación de potencia eléctrica y como agente oxidativo para la conversión de la biomasa contenida en los RSU. No obstante, por la ubicación de la planta, se puede disponer de él para beneficiar a los locatarios de la Central de Abasto. Siendo así que un sistema de refrigeración por adsorción, para carnicerías y pescaderías dentro de la Central, puede utilizar la carga térmica de la corriente de vapor para conservar los productos.

Este proceso de cogeneración no sólo produce energía eléctrica, sino que también es un medio de ahorro energético en sistemas refrigerados, y por lo tanto monetario.

Figura 40 Diagrama de Flujo de Proceso de la Planta IGCC. II configuración, cogeneración.



Fuente: Elaboración propia

## 4.6 Resultados

El cálculo de la exergía y la definición del ambiente de referencia son temas ligados profundamente. El ambiente de referencia aquí utilizado ha sido el más parecido en composición química al real según sugiere Szargut (1961,1971), sin embargo, ha sido necesario utilizar lo propuesto por Bosnjakovic (1963) quien menciona que el ambiente de referencia debe ser definido de acuerdo a las características específicas del proceso que se analiza y de las posibilidades reales de los mecanismos de transformación energética disponibles. Lo cual quiere decir que las condiciones de diseño como presión y temperatura están basadas en la tecnología actualmente disponible.

Siguiendo el orden progresivo establecido en la sección anterior, el balance energético para el caso base queda de la siguiente forma, ver Tabla 17:

*Tabla 17 Balance energético por equipo. Caso base.*

Equipo	Q <sub>out</sub> /W <sub>out</sub> /W <sub>in</sub> kW	% Energía
GA-01	76104.380	35.27%
CG-O2	246.094	0.11%
IC-01	552.156	0.26%
IC-02	176.573	0.08%
GC-03	2123.081	0.98%
IC-03	1855.151	0.86%
CC-01	41956.305	19.44%
GC-01	9508.683	9.04%
GT-01	33161.376	15.37%
HRSG	2003.867	0.93%
TV-01	4886.544	2.26%
TV-02	2001.274	0.93%
COND	11089.005	5.14%
GE-GT	13379.638	6.20%
GE-TV	6750.061	3.13%
DEA	0.000	0%
M-01	0.000	0%
D-01	0.000	0%

Fuente: Elaboración propia.

Al momento de comparar la tabla anterior contra el balance energético obtenido para la segunda propuesta, ver Tabla 18, nos podemos percatar que no existen variaciones significativas en la energía transferida de los equipos hacia el medio ambiente.

*Tabla 18 Balance de energía por equipo. Cogeneración.*

Equipo	Q <sub>out</sub> /W <sub>out</sub> /W <sub>in</sub> kW	%Energía
GA-01	76104.3799	35.48%
CG-O2	246.094408	0.11%
IC-01	552.155837	0.26%
IC-02	176.573483	0.08%
GC-03	2123.08099	0.99%
IC-03	2126.83764	0.99%
CC-01	41956.3051	19.56%
GC-01	19508.6834	9.09%
GT-01	33161.3755	15.46%
HRSG	1800.57542	0.84%
TV-01	4886.54376	2.28%
TV-02	615.918064	0.29%
COND	12473.6096	5.82%
GE-GT	13379.6382	6.24%
GE-TV	5392.41259	2.51%
DEA	0	0%
M-01	0	0%
D-01	0	0%

Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior no es de extrañarse ya que las condiciones de operación son similares. Existe una diferencia de 1.29 kW entre ambos sistemas de energía dispersa al sistema.

La destrucción de exergía de un ciclo es la suma de la destrucción de exergía de los procesos que componen el ciclo, así la destrucción total de este ciclo combinado es de 40 341.49 kW para el caso base y 40 003.54 kW para la configuración de cogeneración. Para la determinación de este parámetro se han tomado en cuenta las características específicas del ciclo Rankine, ya que este ciclo es irreversible internamente únicamente y puede incluir reversibilidades externas al sistema, como la transferencia de calor debida a una diferencia finita de temperatura.

Tabla 19 Vector de destrucción (Bd) del caso base.

Equipo	Bd (kW)	%Destrucción
GASIFICADOR	25,470.80	63.1%
CC-01	9,060.44	22.5%
IC-01	927.52	2.3%
GT-01	897.49	2.2%
GC-01	812.83	2.0%
COND	719.65	1.8%
GC-03	718.71	1.8%
IC-03	530.46	1.3%
HRSR	403.90	1.0%
TV-01	245.19	0.6%
GE-GT	168.21	0.4%
DEA	140.64	0.3%
TV-02	122.55	0.3%
GE-TV	84.86	0.2%
IC-02	25.12	0.1%
M-01	12.26	0.0%
CG-O2	0.59	0.0%
D-01	0.27	0.0%

Fuente: Elaboración propia.

En este tipo de análisis se ha encontrado que las conversiones de energía química a térmica (calderas, hornos, etc.) acaparan aproximadamente el 50% de la irreversibilidad total en el sector industrial (Valero, 1994). En las tablas 19 y 20 se muestran los porcentajes de destrucción de cada equipo, para el caso base y el sistema de cogeneración respectivamente, siendo el gasificador el que mayor exergía destruye.

Entre ambas propuestas existe una diferencia de 337.56 kW de exergía destruida, siendo el caso base el sistema que mayor exergía destruye de los 60.49 MW de exergía total que entran al ciclo.

En la Figura 41-a es posible observar con mayor claridad, mediante un gráfico circular la aportación de irreversibilidades del Gasificador, la Cámara de Combustión y los equipos restantes (otros), comparativamente, que representan 63%, 23% y 14% respectivamente. Se muestra además un gráfico circular de los equipos que tienen una aportación menor, de irreversibilidades al sistema (14% del total), entre sí, con excepción de aquellos cuya aportación es 0 o semejante, ver Figura 41-b.

Tabla 20 Vector de destrucción (Bd) del sistema de cogeneración.

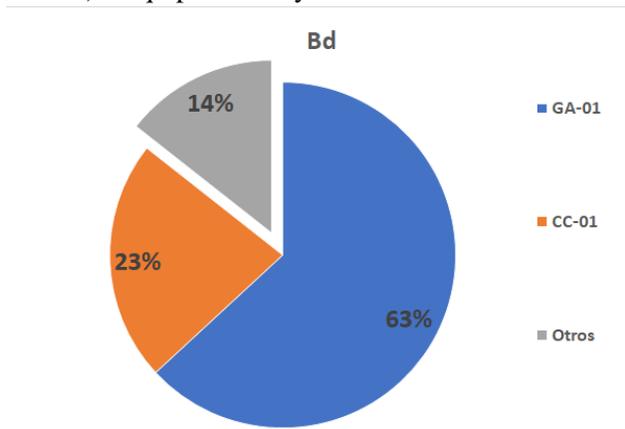
Equipo	Bd (kW)	%Destrucción
GASIFICADOR	26521.15	65%
CC-01	9416.45	23%
IC-01	963.96	2%
GT-01	932.76	2%
GC-01	844.77	2%
GC-03	746.94	2%
IC-03	600.01	1%
HRSRG	382.75	1%
TV-01	254.82	1%
GE-GT	174.82	0%
DEA	81.58	0%
GE-TV	70.46	0%
TV-02	33.97	0%
IC-02	26.10	0%
M-01	12.74	0%
CG-O2	0.61	0%
D-01	0.28	0%

Fuente: Elaboración propia.

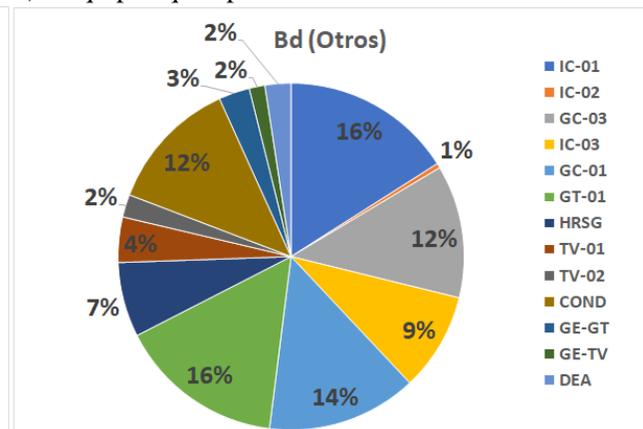
De manera similar se han realizado los diagramas circulares para el segundo sistema, ver Figura 42, en donde resalta a primera vista el cambio en la aportación de irreversibilidades del Condensador, que se encuentra a la salida de la Turbina de Vapor.

Figura 41 Diagramas circulares de porcentaje de irreversibilidad aportado por equipo.

a) Equipos de mayor irreversibilidad.



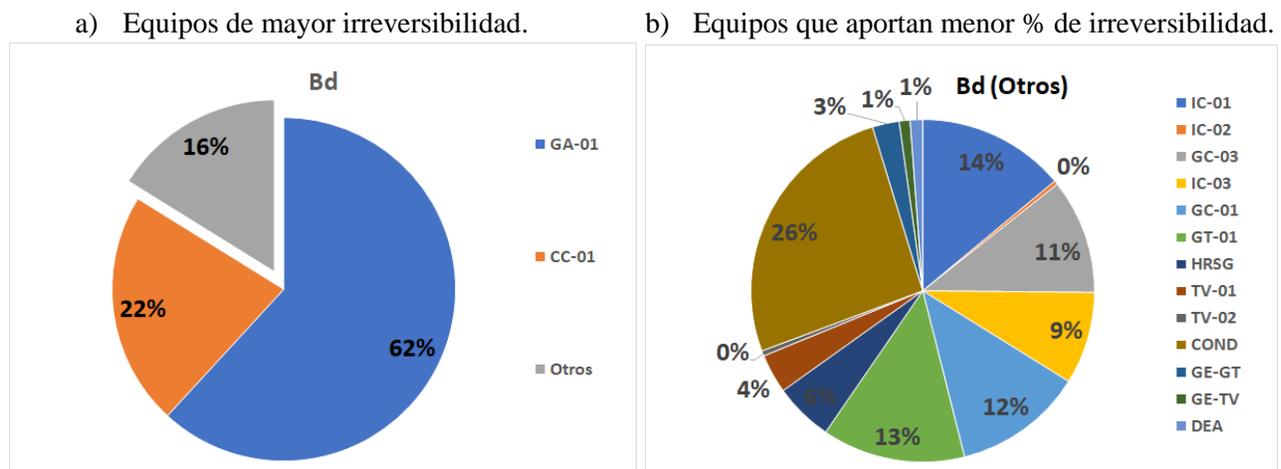
b) Equipos que aportan menor % de irreversibilidad.



Fuente: Elaboración propia.

Este incremento de aportación de irreversibilidades es consecuencia de la mayor carga térmica de la corriente 32 para la segunda configuración debida al cambio de la temperatura de diseño que presenta dicha corriente, necesaria para cubrir el requerimiento térmico del ciclo de refrigeración. Siendo 60 °C la temperatura de esta corriente para el primer sistema y 111 °C para el segundo.

*Figura 42 Diagramas circulares de porcentaje de irreversibilidad aportado por equipo (Cogeneración).*



Fuente: Elaboración propia.

La planta, en ambas configuraciones, depende absolutamente de la cantidad de syngas obtenido de los residuos sólidos urbanos, de composición específica, en la etapa de gasificación, siendo 3.35 kg/s el flujo másico que se puede obtener. Con este flujo el ciclo Brayton (turbina de gas) es capaz de producir 13.38 MW en ambas configuraciones, Ciclo Combinado y Cogeneración.

Sin embargo, existe una diferencia de 1.35 MW, producidos por el Ciclo Rankine (turbina de vapor), entre ambas configuraciones, siendo 6.75 MW lo producido por este ciclo para la primera configuración y 5.39 MW para el segundo caso de estudio.

Por lo tanto, se deben calcular las eficiencias energéticas y exergéticas de ambas propuestas para poder determinar cuál de éstas es más viable energéticamente.

La eficiencia energética es un parámetro que nos permite saber el porcentaje de energía aprovechada y cómo está siendo aprovechada ésta. Se tiene entonces que el caso base tiene una

eficiencia energética del 28.19% como conjunto, es decir toda la planta, y el ciclo combinado por separado presenta eficiencia de 40%. El aumento en la eficiencia del ciclo combinado se debe a que el cálculo de este parámetro no incluye la energía transformada por el gasificador.

La eficiencia exergética de un sistema es un parámetro que nos permite saber la cantidad de exergía utilizada para obtener un producto de cierta calidad a partir de la calidad que presenta la materia prima con respecto a un ambiente de referencia. Con base en la calidad que presentan los RSU, el Coque Metalúrgico y la Caliza y la Potencia Eléctrica obtenida a partir del sistema, la primera configuración de esta planta IGCC tiene 29.8% de eficiencia exergética.

Análogamente, el análisis de la segunda propuesta arroja como resultado 43% de eficiencia energética de todo el sistema, 38% de eficiencia energética del ciclo combinado y 30.39% de eficiencia exergética.

Existe un delta de eficiencia exergética de 0.59% entre ambas configuraciones siendo el sistema de cogeneración aquel que aprovecha más eficientemente exergéticamente los recursos provistos, sean RSU, Coque Metalúrgico, Caliza y Agua.

Además, se han podido determinar tres indicadores de conversión de vital importancia para el análisis económico posterior si se quiere continuar con el proyecto. Éstos son para ambas opciones los siguientes:

$$\alpha = 668.5 \text{ [=]} \frac{\text{kg}_{\text{syngas}}}{\text{Ton}_{\text{mezcla recursos}}} \left( \frac{\text{Masa de syngas obtenido}}{\text{Masa de recursos suministrados}} \right)$$

$$\beta = 1.112\text{E-}3 \text{ [=]} \frac{\text{MWh}}{\text{kg}_{\text{syngas}}} \left( \frac{\text{Energía eléctrica producida TG}}{\text{Masa de syngas disponible}} \right)$$

$$\gamma = 15780.18 \text{ [=]} \frac{\text{MJ}_{\text{mezcla de recursos}}}{\text{MWh}_e} \left( \frac{\text{Energía de recurso suministrado}}{\text{Energía eléctrica producida en TG}} \right)$$

La eficiencia exergética del sistema y los factores de conversión aquí presentados, son parámetros tomados en cuenta para determinar con qué configuración se profundizará el trabajo más adelante en el proyecto para el desarrollo de la Ingeniería Básica, Ingeniería de Detalle, Ingeniería de procura y Coordinación, Evaluación y Control del mismo.

## Conclusiones

La Reforma Energética publicada en 2013 ha abierto la competencia en el sector de los energéticos, permitiendo a los particulares la importación de estos para ser comercializados a terceros, y la disminución de la producción de los energéticos fósiles como el petróleo y el gas natural favorece esta condición. Además, la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) publicada en 2014 ofrece la oportunidad a empresas privadas de generar y comercializar energía eléctrica libremente a partir de su publicación.

El índice de dependencia energética del país con valor de 0.84, y la tendencia a la baja de éste, es un reflejo claro de las coyunturas que tiene México en el sector energético. El consumo de energía ha superado, desde el año 2015, la producción de energía primaria por lo que la diversificación energética es una necesidad de primer orden.

Por otro lado, se debe solucionar el problema y disminuir el riesgo que representan los Residuos Sólidos Urbanos generados a nivel nacional, pero sobre todo aquellos generados en la Ciudad de México, ya que el aumento súbito en el volumen diario producido, debido a la creciente industrialización, ha provocado el cierre inminente del relleno sanitario “Bordo Poniente”, unos de los seis rellenos sanitarios dónde éstos eran puestos para disposición final, actualmente solo son cinco, cuatro de ellos se ubican en el Estado de México (Chicoloapan, Cuautitlán, Milagro y Cañada) y uno en Cuautla, Morelos.

Los rellenos sanitarios están considerados como métodos tradicionales de disposición final. Dichos métodos han funcionado bien tiempo atrás, sin embargo, es momento de empezar a tomar en cuenta tecnologías que permitan alejarnos de estos métodos que empiezan a ser obsoletos por los riesgos ambientales que representan y que además proporcionen un beneficio a partir de a partir de estos sólidos, que en otro momento pudieron ser considerados como inservibles.

La tecnología “Thermoselect” desarrollada por JFE Engineering, es un proceso de tratamiento de residuos sólidos que es capaz de reciclar residuos sólidos urbanos e industriales con la emisión mínima de contaminantes del medio ambiente, mediante el uso de los procesos de gasificación y reformación. El proceso recupera efectivamente gas de síntesis, metales y minerales de los residuos sólidos utilizados como materia prima. Se ha determinado que es posible obtener 3.35 kg/s de gas de síntesis, con un contenido de 30.7% de hidrógeno, a partir de los residuos sólidos

urbanos generados en la Central de Abasto, con alto porcentaje de contenido de orgánicos y cuya fracción de Hidrógeno en porcentaje es de 19.7%.

Asimismo, es posible utilizar el gas de síntesis recuperado, en una turbina de gas con la capacidad de generar 13.38 MW de potencia eléctrica para la venta al público y el consumo interno de los motores eléctricos utilizados durante este proceso. Adicionalmente y gracias a un sistema HRSG (Heat Recovery Steam Generator), se ha determinado que es posible utilizar la carga térmica de los gases de combustión y generar 5.39 MW mediante una Turbina de Vapor.

El análisis exergético de una planta de Ciclo Combinado con Gasificación Integrada (IGCC), con la finalidad de usar fuentes energéticas alternativas como lo son los residuos sólidos urbanos, surge de la dependencia energética que el país tiene. Existen diversos factores que influyen sobre la viabilidad energética y exergética de un proyecto de este tipo tales como la tecnología disponible y la configuración de los equipos para el aprovechamiento energético de las corrientes involucradas.

Se concluye que el análisis realizado y presentado en este trabajo nos ha permitido determinar que los RSU se aprovecharán exergéticamente 0.59% mejor en un sistema IGCC con Cogeneración que en un sistema IGCC simple, que aunado a los indicadores de conversión de obtención de masa de syngas, y entrega de energía eléctrica, establecen las bases para continuar con los estudios posteriores (económicos) del proyecto.

El aprovechamiento de estos residuos reduce la emisión de sustancias que afectan la capa de ozono y que por lo tanto representan un peligro para la vida en nuestro planeta por lo que además del beneficio ambiental se obtiene un beneficio social dado que la implementación de esta tecnología permite renunciar a la construcción de rellenos sanitarios dando como resultado un mejoramiento en la calidad de vida de los habitantes tanto de la Ciudad de México como de aquellos que viven cerca de estos sitios de disposición final. Además, el aprovechamiento de la energía térmica generada aunado a la generación de energía eléctrica representan un ahorro monetario en cuestión energética por lo que un beneficio económico complementa la sostenibilidad del proyecto.

## Bibliografía

- [1] Ajay, K. (Julio de 2009). Thermochemical Biomass Gasification: A Review of the Current Status of the Technology. *Energies*, págs. 556-581.
- [2] Anukam, A. (2014). Computer Simulation of the Mass and Energy Balance during Gasification of Sugarcane Bagasse. *Journal of Energy*.
- [3] Atmaca, M. (2010). Efficiency Analysis of Combined Cogeneration Systems with Steam and Gas Turbines . *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.*, Turquía.
- [4] Bejan, A. (2016). *Advanced Engineering Thermodynamics*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [5] Castrejón-Godínez, M. L. (2015). Analysis of solid Waste Management and Greenhouse Gas Emissions in Mexico. A Study Case in the Central Region. *Journal of Environmental Protection*, págs. 146-159.
- [6] Cengel, Y. A. (2012). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.
- [7] Conan, M. (2000). Environmentalism in Landscape Architecture.
- [8] Council, W. E. (2016). World Energy Resources. *World Energy Resources. Waste to Energy*.
- [9] *Curso Internacional de Gestión Ambiental "Herramientas de Gestión Ambiental"*. (2002). Rocha.
- [10] Duhart-Ballesteros, J. P. (Julio de 2008). COMBUSTIÓN DEL PETCOKE CON ADICIÓN DE CALIZA EN UN HOGAR DE LECHO FLUIDIZADO CIRCULANTE. Concepción.
- [11] Durán-Moreno, A. (2013). MEXICO CITY'S MUNICIPAL SOLID WASTE CHARACTERISTICS AND COMPOSITION ANALYSIS. 39-46.
- [12] EDUCOGEN. (Diciembre de 2001). The European Educational Tool Cogeneration.

- [13] García, J., Garro, J., & Ortega, R. (2017). Trash to Cash: generación de potencia eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos utilizando tecnología de gasificación. CDMX, México.
- [14] Ghosh K, T. (2009). *Energy Resources and Systems Vol. 1 Fundamentals and Non-Renewable Resources*. Columbia: Springer.
- [15] Hannah, L. (2017). Petrographic analysis and characterization of a blast furnace coke and its wear mechanisms. *Fuel*, 89-99.
- [16] Hernández, J. (2010). Gasification of biomass wastes in an entrained flow gasifier: Effect of the particle size and the residence time. *Fuel Processing Technology*, 681-692.
- [17] Herrera-Toledo, R. (2018). Análisis de reversibilidad de un ciclo de gas con compresión húmeda. *MEMORIAS DEL XXIV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*.
- [18] Huiyuan, S. (2016). The Concept, Design and Performance of a Novel Rotary Kiln Type Air-Staged Biomass Gasifier. *Energies*.
- [19] JFE Engineering Corporation. (2019). *JFE High-temperature Gasifying and Direct Melting System*. Obtenido de [http://www.jfe-eng.co.jp/en/products/environment/urban\\_environment/urb04.html](http://www.jfe-eng.co.jp/en/products/environment/urban_environment/urb04.html)
- [20] Jung, C. (2007). *Slow Pyrolysis vs Gasification: mass and energy balances using a predictive model*. Bruselas.
- [21] Juniper. (s.f.). Pyrolysis and Gasification Factsheet. Inglaterra.
- [22] Koretsky, M. (2013). *Engineering and Chemical Thermodynamics*. WILEY.
- [23] LEY DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA. (11 de Agosto de 2014). Diario Oficial de la Federación. CDMX, México.
- [24] Mazzoni, L., Ahmed, R., & Janajreh, I. (2017). Plasma gasification of two waste streams: Municipal solid waste and hazardous waste from the oil and gas industry. *Energy PROCEDIA*, 4159-4166.

- [25] McKellar, M. (Noviembre de 2008). The Production of Syngas Via High Temperature Electrolysis and Biomass Gasification. *2008 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Boston, Massachusetts, EUA.
- [26] Mexicana, G. d. (s.f.). PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 2013-2018. CDMX, México.
- [27] Milenio. (31 de Mayo de 2016). *CFE firma 27 contratos con productores independientes de energía*. Obtenido de QuimiNet: <https://www.quiminet.com/noticias/cfe-firma-27-contratos-con-productores-independientes-de-energia-4224855.htm>
- [28] Montes-Villalón, J. M. (2009). *Termoeconomía y optimización energética*. Madrid: Fundación Gómez Pardo en colaboración con el Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas.
- [29] Mora Reyes, J. Á. (2004). *EL PROBLEMA DE LA BASURA EN LA CIUDAD DE MÉXICO*. CDMX.
- [30] Moran, M. J., & Shapiro, H. N. ( 2004). *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. España: Editorial Reverté.
- [31] Nagayama, S. (s.f.). JFE High-Temperature Gasifying and Direct Melting Furnace. *High Energy Efficiency Thermal WtE Plant for MSW Recycling*. Tsurumi, Yokohama, Japón.
- [32] Ojeda-Benítez, S. (2003). The municipal solid waste cycle in Mexico: final disposal. *Resources Conservation and Recycle*, 239-250.
- [33] Preciado, J. (Noviembre de 2012). Simulation of Synthesis Gas Production from Steam Oxygen Gasification of Colombian Coal Using Aspen Plus. *Energies*, págs. 4924-4940.
- [34] Reddy, S. (2014). Supercritical water gasification of biomass for hydrogen production. *International journal of hydrogen energy*, 1-15.
- [35] Sadaka, S. (2017). Gasification, Producer Gas and Syngas. Arkansas, EUA.

- [36] SEDEMA. (2016). Inventario de residuos sólidos. Ciudad de México. *Inventario de residuos sólidos. Ciudad de México*. CDMX, México.
- [37] SEDEMA. (2018). Inventario de Residuos Sólidos Urbanos, CDMX 2017. CDMX, CDMX, México.
- [38] SEMARNAT. (2005). Manual de manejo adecuado de residuos sólidos. Escuela limpia en el Distrito Federal. *Manual de manejo adecuado de residuos sólidos. Escuela limpia en el Distrito Federal*. CDMX, México.
- [39] SENER. (2018). BALANCE NACIONAL DE ENERGÍA. México.
- [40] Siddique, R. (2008). *Waste Materials and By-Products in Concrete*. Springer.
- [41] Siirala, A. (17 de 11 de 2013). Comparison of gasification, pyrolysis and combustion.
- [42] Singh-Brar, J. (2013). Co-Gasification of Coal and Hardwood Pellets: A Case Study. *American Journal of Biomass and Bioenergy*, págs. 25-40.
- [43] Soundararajan, K. (2014). Sankey diagram framework for energy and exergy flows. *Applied Energy*, 1035-1042.
- [44] Tippens, P. (2001). *FÍSICA Conceptos y aplicaciones*. D.F.: McGraw Hill.
- [45] Uchiyama, T. (Marzo de 2014). Reduction of Coke Consumption in High-Temperature Gasifying and Direct Melting System. *JFE TECHNICAL REPORT*. Japón.
- [46] Urdiales-Montesino, Á. (2016). Exergy Analysis of a Syngas-Fueled Combined Cycle with Chemical-Looping Combustion and CO<sub>2</sub> Sequestration. *Entropy*.
- [47] Wu, Y. (Enero de 2014). Energy and Exergy Analysis of High Temperature Agent Gasification of Biomass . *Energies*, págs. 2107-2122.
- [48] Yamada, S. (Julio de 2004). Thermoselect Waste Gasification and Reforming Process. Japón.
- [49] Yaws, C. (1999). *CHEMICAL PROPERTIES HANDBOOK*. Texas: McGraw-Hill.

## **Anexos**

## **Anexo I**

### **Diagrama de Flujo de Proceso y Balance de Energía (Ambas configuraciones)**



### Balance de energía del caso base.

Número de corriente		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	kJ/kg	N/A	N/A	N/A	540.59	1704.13	1183.88	309.84	139.43	774.61	92.95
s	kJ/kg C	N/A	N/A	N/A	4.33	2.50	1.40	0.85	0.44	1.61	0.31
b	kJ/kg	N/A	N/A	N/A	74.28	959.96	767.16	57.80	9.60	295.74	2.95
H	kW	0	0	0	1783.93	5696.07	601.80	1035.65	466.04	2589.12	310.69
B	kW	0	0	0	245.14	3208.68	389.97	193.20	32.10	988.53	9.87

Número de corriente		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
h	kJ/kg	126.22	763.49	625.28	463.10	143.00	3373.65	3373.65	344.97	975.70	251.56
s	kJ/kg C	0.44	2.14	1.80	1.00	0.43	6.60	6.60	0.17	0.93	0.83
b	kJ/kg	0.57	130.37	92.92	165.39	16.55	1411.45	1411.45	296.59	700.51	7.93
H	kW	259.39	1496.25	4255.38	29959.10	9251.03	22959.59	22638.26	21164.17	63120.47	1375.58
B	kW	1.18	255.49	632.36	10699.59	1070.60	9605.71	9471.28	18196.06	45317.84	43.37

Número de corriente		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
h	kJ/kg	251.87	561.59	2859.81	3373.65	2883.62	466.01	26.98	561.59	562.94	2645.44
s	kJ/kg C	0.83	1.67	6.57	6.60	6.60	4.33	0.09	1.67	1.67	6.80
b	kJ/kg	8.22	67.63	900.80	1406.89	914.57	0.00	0.11	67.63	68.97	623.92
H	kW	1377.31	3821.97	5604.51	321.33	5925.85	1537.84	1655.48	1100.59	1103.22	14465.86
B	kW	44.94	460.25	1765.35	134.00	1879.45	0.00	6.83	132.54	135.16	3411.76

Número de corriente		31	32	33
h	kJ/kg	2645.44	2279.46	563.09
s	kJ/kg C	6.80	6.92	1.65
b	kJ/kg	623.92	221.56	75.64
H	kW	3285.86	12464.58	3832.11
B	kW	774.97	1211.55	514.79



### Balance de energía del sistema de cogeneración.

Número de corriente		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	kJ/kg	N/A	N/A	N/A	540.59	1704.13	1183.88	309.84	139.43	774.61	92.95
s	kJ/kg C	N/A	N/A	N/A	4.33	2.50	1.40	0.85	0.44	1.61	0.31
b	kJ/kg	N/A	N/A	N/A	74.28	959.96	767.16	57.80	9.60	295.74	2.95
H	kW	0	0	0	1783.93	5696.07	601.80	1035.65	466.04	2589.12	310.69
B	kW	0	0	0	245.14	3208.68	389.97	193.20	32.10	988.53	9.87

Número de corriente		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
h	kJ/kg	126.04	763.49	595.41	463.10	143.00	3373.65	3373.65	344.97	975.70	419.14
s	kJ/kg C	0.44	2.14	1.73	1.00	0.43	6.60	6.60	0.17	0.93	1.31
b	kJ/kg	0.37	130.37	84.42	165.39	16.55	1411.45	1411.45	296.59	700.51	33.99
H	kW	259.02	1496.25	4052.09	29959.10	9251.03	22959.59	22638.26	21164.17	63120.47	2464.32
B	kW	0.77	255.49	574.54	10699.59	1070.60	9605.71	9471.28	18196.06	45317.84	199.83

Número de corriente		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
h	kJ/kg	419.37	561.59	2859.81	3373.65	2883.62	466.01	26.98	561.59	562.94	2645.44
s	kJ/kg C	1.31	1.67	6.57	6.60	6.60	4.33	0.09	1.67	1.67	6.80
b	kJ/kg	34.20	67.63	900.80	1406.89	914.57	0.00	0.11	67.63	68.97	623.92
H	kW	2465.68	3821.97	5604.51	321.33	5925.85	1537.84	1655.48	1100.59	1103.22	15553.85
B	kW	201.08	460.25	1765.35	134.00	1879.45	0.00	6.83	132.54	135.16	3668.36

Número de corriente		31	32	33
h	kJ/kg	2645.44	2540.68	573.13
s	kJ/kg C	6.80	6.83	1.67
b	kJ/kg	623.92	510.14	78.32
H	kW	2197.86	14937.93	3900.50
B	kW	518.36	2999.39	533.04

## **Anexo II**

### **Glosario**

**Calor:** Transferencia de energía térmica debida a una diferencia de temperatura. (Tippens, 2001)

**Eficiencia:** Cociente de la suma de productos entre la suma de recursos (en términos energéticos).

**Energía interna:** Propiedad termodinámica (fundamental) definida por la primera ley de la termodinámica. Es la suma de las energías cinética y potencial de los átomos de una sustancia ([internal energy](https://www.thefreedictionary.com/internal+energy), 2019).

**Energía:** Capacidad para realizar un trabajo. (Tippens, 2001)

**Entalpía de vaporización:** Cantidad de energía necesaria para que la unidad de masa de una sustancia que se encuentra en equilibrio con su propio vapor a presión atmosférica sufra un cambio de fase (The Free Dictionary, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/phase2.html>, 2019).

**Entalpía:** Propiedad termodinámica (compuesta) que está en función de la energía interna, de la presión y volumen del sistema (The Free Dictionary, [enthalpy](https://www.thefreedictionary.com/enthalpy), 2019).

**Entropía:** Propiedad termodinámica (fundamental) definida por la segunda ley de la termodinámica que sirve como medida para saber cuan dispersa está la energía de un sistema (The Free Dictionary, [entropy](https://www.thefreedictionary.com/entropy), 2019).

**Equilibrio termodinámico:** Estado en el que dos sistemas se encuentran en equilibrio químico, térmico y mecánico.

**Estado de equilibrio:** Estado en el que al menos una variable de estado asociada a dos sistemas, por ejemplo, la temperatura (T), tiene el mismo valor.

**Exergía:** Es el trabajo útil máximo que puede obtenerse cuando se lleva desde su estado original al de equilibrio termodinámico con el ambiente, sin más intervención que la interacción de éste con sus alrededores (The Free Dictionary, [exergy](https://www.thefreedictionary.com/exergy), 2019).

**Irreversibilidad:** Fenómeno que ocurre durante un proceso con pérdida o disipación de energía atribuible al cambio o redistribución de los átomos en el seno de dicho sistema, atribuible al rozamiento intermolecular y a las colisiones (Wikipedia, 2019).

**Proceso reversible:** Aquel que, una vez ha tenido lugar, el sistema puede ser regresado a su estado original sin ningún cambio neto en sus alrededores. Este resultado se obtiene únicamente cuando la fuerza motriz es infinitesimalmente pequeña. (Koretsky, 2013)

**Temperatura:** Propiedad termodinámica (fundamental) definida por la ley cero de la termodinámica. Es la medida de la energía cinética media de átomos y moléculas de un sistema (The Free Dictionary, [temperature](https://www.thefreedictionary.com/temperature), 2019).

**Trabajo:** Desplazamiento causado por una fuerza en los límites de un sistema. (Koretsky, 2013)

## **Anexo III**

### **Lista de figuras**

Figura 1 Evolución de la producción y el consumo nacional de energía .....	14
Figura 2 Índice de dependencia energética.....	14
Figura 3 Estructura de la producción de energía primaria, 2016 (Petajoules). .....	16
Figura 4 Esquema de la materia prima y productos que se pueden obtener.....	17
Figura 5 Jerarquía del marco regulatorio del sector eléctrico. ....	18
Figura 6 Porcentaje de generación de residuos sólidos urbanos de las delegaciones.....	24
Figura 7 Instalaciones de la CDMX para el tratamiento de residuos. ....	27
Figura 8 Ubicación de estaciones de transferencia.....	27
Figura 9 Cantidad de residuos ingresados a plantas compactadoras. ....	28
Figura 10 Ubicación de las plantas de composta.....	29
Figura 11 Tecnologías disponibles para la conversión “Waste-to-Energy”.....	31
Figura 12 El análisis de muchos procesos complejos puede ser reducido a un nivel simple utilizando algunas idealizaciones. ....	35
Figura 13 Diagramas T-s y P-V para un ciclo de potencia.....	36
Figura 14 Diagramas P-V y T-S de un ciclo de Carnot.....	37
Figura 15 Comparación de los procesos de compresión real e isentrópico.....	39
Figura 16 Comparación de las expansiones real e isentrópica en una turbina. ....	40
Figura 17 Representación de turbina de gas a ciclo abierto. ....	41
Figura 18 Motor de turbina de gas de ciclo cerrado. ....	42
Figura 19 Diagramas T-s y P-v para un ciclo Brayton ideal. ....	43
Figura 20 Desviación de un ciclo de turbina de gas real del ciclo Brayton ideal como resultado de irreversibilidades.....	45
Figura 21 Ciclo Rankine ideal simple. ....	46
Figura 22 a) Desviación del ciclo real de potencia de vapor respecto del ciclo Rankine ideal. b) Efectos de las irreversibilidades de la bomba y la turbina en el ciclo Rankine ideal. ....	47
Figura 23 Fases de un proyecto. ....	49
Figura 24 Esquema de un ciclo de potencia. ....	51
Figura 25 Variación de la energía interna de un sistema.....	51
Figura 26 Diagrama de calentamiento de agua con A) Energía eléctrica y B) Combustible. ...	52
Figura 27 Transferir calor a una rueda de paletas no hará que ésta gire. ....	53
Figura 28 Los procesos ocurren en cierta dirección. ....	54

Figura 29 Isla de gasificación.....	57
Figura 30 Corte transversal del gasificador.....	58
Figura 31 Capa de gasificación dentro del gasificador.....	59
Figura 32 Cama móvil. ....	61
Figura 33 Capa de relleno de coque. ....	61
Figura 34 Salida de slag. ....	62
Figura 35 Free board. ....	63
Figura 36 Isla de Integración energética.....	64
Figura 37 Isla de Ciclo Combinado (generación de potencia eléctrica).....	66
Figura 38 Diagrama de Flujo de Proceso de la Planta de Ciclo Combinado con Gasificación Integrada. ....	70
Figura 39 Intercambiador de calor IC-01. ....	72
Figura 40 Diagrama de Flujo de Proceso de la Planta IGCC. II configuración, cogeneración. ....	75
Figura 41 Diagramas circulares de porcentaje de irreversibilidad aportado por equipo. ....	79
Figura 42 Diagramas circulares de porcentaje de irreversibilidad aportado por equipo (Cogeneración). ....	80

## **Anexo IV**

### **Lista de tablas**

Tabla 1 Producción de energía primaria (Petajoules).....	15
Tabla 2 Tarifas domésticas. ....	20
Tabla 3 Temperatura media asociada a la tarifa. ....	21
Tabla 4 Tarifas específicas de estímulo.....	21
Tabla 5 Generación per cápita por delegación. ....	24
Tabla 6 Comparación entre Pirólisis, Gasificación y Combustión.....	33
Tabla 7 Clasificación comercial de las turbinas de gas. ....	38
Tabla 8 Lista de equipos. Isla de gasificación. ....	56
Tabla 9 Composición física de los RSU de la Ciudad de México.....	60
Tabla 10 Composición de la basura en la delegación Iztapalapa. ....	60
Tabla 11 Composición del coque metalúrgico. ....	60
Tabla 12 Composición del syngas obtenido a partir de RSU.....	63
Tabla 13 Lista de equipos, Sección I, Isla de Integración Energética. ....	65
Tabla 14 Lista de equipos, Ciclo Brayton. ....	66
Tabla 15 Lista de equipos, Ciclo Rankine.....	66
Tabla 16 Identificación de corrientes. ....	71
Tabla 17 Balance energético por equipo. Caso base. ....	76
Tabla 18 Balance de energía por equipo. Cogeneración. ....	77
Tabla 19 Vector de destrucción (Bd) del caso base.....	78
Tabla 20 Vector de destrucción (Bd) del sistema de cogeneración.....	79

## **Anexo V**

### **Lista de ecuaciones representativas**

Ecuación 1	$\eta_{térr} = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}}$ o $\eta_{térr} = \frac{W_{neto}}{q_{entrada}}$ .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Ecuación 2	$\eta_{térr,Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Ecuación 3	$\eta_C = \frac{\left( -\dot{W}_C / \dot{m} \right)_s}{\left( -\dot{W}_C / \dot{m} \right)} .....$	40
Ecuación 4	$\eta_E = \frac{\left( -\dot{W}_C / \dot{m} \right)}{\left( -\dot{W}_C / \dot{m} \right)_s} .....$	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Ecuación 5	$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{out} - h_{in} .....$	43
Ecuación 6	$\eta = 1 - \frac{1}{\left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}} .....$	44
Ecuación 7	$Q_{in} + W_{in} = Q_{out} + W_{out} .....$	51
Ecuación 8	$\therefore \sum_{i=1}^n \dot{E}_{in} = \sum_{i=1}^n \dot{E}_{out} .....$	51
Ecuación 9	$dU = \delta Q - \delta W .....$	51
Ecuación 10	$\dot{S}_{generada} = \sum \dot{S}_{final} - \sum \dot{S}_{inicial} .....$	52
Ecuación 11	$s_0 - s_{00} = Cp \ln \left( \frac{T_0}{T_{00}} \right) .....$	72
Ecuación 12	$s_0 - s_{00} = Cp \ln \left( \frac{T_0}{T_{00}} \right) - R \ln \left( \frac{P_0}{P_{00}} \right) .....$	72
Ecuación 13	<b>Exergía de flujo de calor</b> $b_q = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) .....$	73
Ecuación 14	<b>Exergía física</b> $b_f = \sum_{i=T}^n m_T (h_T - h_0) - T_0 (s_T - s_0) .....$	73

Ecuación 15      **Exergía química**  $\frac{b_{quim}}{PCI} = \left( 1.033 + 0.0169 \left( \frac{\beta}{\alpha} \right) \right) - \left( \frac{0.0698}{\alpha} \right) \% \dots\dots\dots 73$

Ecuación 16       $\eta_{exe} = \frac{\Sigma B_{salida}}{\Sigma B_{entrada}} \dots\dots\dots 73$