



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de ciclo de vida aplicado a Plantas
termoeléctricas convencionales y de ciclo combinado**

T E S I S

Que para obtener el título de:
Ingeniero Mecánico.

P R E S E N T A :
Roberto Ramírez Cruz

Directora de tesis: Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez



CIUDAD UNIVERSITARIA

MÉXICO, D.F. 2014

Agradecimientos.

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo.

A mis padres Natalio y Rosa, por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida, porque gracias a su cariño, guía y apoyo he llegado a realizar uno de los anhelos más grandes de mi vida, fruto de inmenso apoyo, amor y confianza con los cuales he logrado terminar mis estudios profesionales que constituyen el legado más grande que pudiera recibir.

A mi hermano Jhonatan, por ser parte importante de mi vida, que con sus consejos me ha ayudado a afrontar los retos que se me han presentado a lo largo de mi vida y, por ser un ejemplo de desarrollo profesional a seguir.

A mi directora de tesis Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez, por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia, su motivación y por la dirección de este trabajo ha logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito.

A mis sinodales, por su dedicación, por sus enseñanzas, sus consejos, sus comentarios y, sobre todo, por compartir su tiempo conmigo para la realización de esta tesis.

A mis maestros, por haber compartido conmigo sus conocimientos y sobre todo su amistad, por que influyeron con sus lecciones y experiencias en formarme como una persona de bien y preparada para los retos que pone la vida.

A mis amigos de la facultad Juan, Omar y Farid, por todos los momentos que pasamos juntos y por haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidaré.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, mi alma mater, por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí y por todo lo que me han brindado.

A todos ustedes, ¡muchas gracias!.

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

Roberto Ramírez Cruz

Índice

1. Introducción	1
2. Análisis de ciclo de vida.....	3
2.1. Antecedentes	4
2.2. Historia.....	5
2.3. Definición de análisis de ciclo de vida	6
2.4. Metodología.....	7
2.4.1. Definición del objetivo y el alcance	8
2.4.2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)	9
2.4.3. Evaluación de impactos.....	13
2.4.4. Interpretación de resultados.....	14
3. Antecedentes de Plantas Termoeléctricas.	15
3.1. Definición de Planta Termoeléctrica	16
3.2. Tipos de Plantas Termoeléctricas.....	16
3.2.1. Tipos de plantas según el servicio que brindan.....	16
3.2.2. Tipos de plantas para cubrir la demanda.....	16
3.3. Componentes principales de centrales termoeléctricas.....	19
3.4. Componentes principales de ciclos combinados con turbina de gas	19
3.5. Combustibles para Plantas Termoeléctricas	20
3.5.1. Gas Natural.....	21
3.5.2. Combustóleo.....	22
3.6. Principios de combustión.....	23
3.6.1. Tipos de combustión	23
3.6.2. Química de la combustión.....	24
3.6.3. Poder calorífico	27
3.7. Generadores de vapor.....	31
3.7.1. Clasificación	31
3.7.2. Componentes principales de un generador de vapor	35
3.7.3. Calidad del agua en las calderas.....	37
3.7.4. Materiales	37
3.8. Turbinas de vapor	38
3.8.1. Clasificación.....	39
3.9. Turbinas de gas.....	40
3.9.1. Ciclos reales con turbinas de gas.....	42
4. Aplicación de la metodología de ACV usando SimaPro.	44
4.1. Definición del objetivo y el alcance	45
4.1.1. Motivo.....	45
4.1.2. Objetivo.....	45
4.1.2. Alcance y límites del sistema.....	45
4.1.4. Unidad funcional	45
4.1.5. Definición del objetivo y el alcance en SimaPro.....	48

Contenido.

4.2. Análisis del inventario	49
4.2.1. Planta Termoeléctrica convencional	51
4.2.2. Planta de Ciclo Combinado.....	54
4.3. Evaluación de impactos.....	59
4.4. Interpretación de resultados	65
5. Conclusiones.....	70
Bibliografía.....	72
Anexo A.....	75
Anexo B.....	80

TABLAS

Tabla 2.1. Aplicaciones del ACV.....	4
Tabla 3.2.2. Tipos de Plantas termoeléctricas para cubrir la demanda.....	18
Tabla 3.5.1. Especificaciones del gas natural en México	21
Tabla 3.5.2. Análisis y propiedades fisicoquímicas de un combustóleo y del crudo Maya despuntado	22
Tabla 3.6.2. Composición del aire seco	24
Tabla 3.6.3.2. Reacciones químicas comunes en la combustión y su energía liberada.....	29
Tabla 3.6.3.3. Poder calorífico de los combustibles.....	30
Tabla 4.2.1. Parámetros de diseño planta termoeléctrica convencional.....	51
Tabla 4.2.1.1. Resultados del cálculo del ecobalance para la construcción de la planta referidas a la unidad funcional.....	52
Tabla 4.2.1.2. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación del generador de vapor referidas a la unidad funcional.....	52
Tabla 4.2.1.3. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación de la turbina de vapor referidas a la unidad funcional.....	53
Tabla 4.2.1.4. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación del generador eléctrico referidas a la unidad funcional.....	54
Tabla 4.2.2. Parámetros de diseño planta ciclo combinado.....	54
Tabla 4.2.2.1. Resultados del cálculo del ecobalance para la construcción de la planta referidas a la unidad funcional.....	55
Tabla 4.2.2.2. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación de la turbina de gas referidas a la unidad funcional.....	56
Tabla 4.2.2.3. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación de la caldera de recuperación referidas a la unidad funcional.....	56
Tabla 4.2.2.4. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación de la turbina de vapor referidas a la unidad funcional.....	57
Tabla 4.2.2.5. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación del generador eléctrico referidas a la unidad funcional.....	58
Tabla 4.3. Cantidad de impactos producidos por categoría para las entradas analizadas.....	59

Contenido.

Tabla B-1 Composición del gas natural	80
---	----

FIGURAS

Figura 2.3. Ciclo de vida.....	6
Figura 2.4. Fases de un ACV.....	7
Figura 2.4.2.1. Ecobalance de un proceso productivo	9
Figura 2.4.2.2. Árbol de procesos ACV.....	11
Figura 2.4.3. Estructura de la caracterización y problemas estándar	13
Figura 3.3. Esquema de una planta termoeléctrica.....	19
Figura 3.4. Esquema de una planta de ciclo combinado 2x1.....	20
Figura 3.7.1.3.1. Caldera acuatubular	32
Figura 3.7.1.3.2. Caldera pirotubular	32
Figura 3.7.1.3.3. Caldera para termoeléctrica.....	33
Figura 3.7.1.3.4. Caldera de recuperación	34
Figura 3.7.2. Componentes de caldera de vapor para planta termoeléctrica	35
Figura 3.8.1. Turbina de vapor.....	38
Figura 3.8.2. Esquema básico de una turbina de vapor	39
Figura 3.9.1. Turbina de gas	40
Figura 3.9.2. Esquema básico de una turbina de gas.....	40
Figura 3.9.3. Diagramas T-s y P-V del ciclo Brayton ideal	41
Figura 3.9.4. Turbina de gas con regenerador.....	42
Figura 3.9.5. Diagrama T-s del ciclo Brayton con regeneración.....	43
Figura 4.1.3.1. Límites del sistema para la producción de energía en una planta termoeléctrica convencional.....	46
Figura 4.1.3.2. Límites del sistema para la producción de energía en una planta de Ciclo combinado de gas	47
Figura 4.2.1. Árbol de procesos Termoeléctrica convencional	49
Figura 4.2.2. Árbol de procesos Ciclo combinado gas.....	50
Figura 4.2.1.1. Ecobalance para la construcción de la planta.....	51
Figura 4.2.1.2. Ecobalance para la operación del generador de vapor.....	52
Figura 4.2.1.3. Ecobalance para la operación de la turbina de vapor	53
Figura 4.2.1.4. Ecobalance para la operación del generador eléctrico.....	53
Figura 4.2.2.1. Ecobalance para la construcción de la planta.....	55
Figura 4.2.2.2. Ecobalance para la operación de la turbina de gas.....	55
Figura 4.2.2.3. Ecobalance para operación de la caldera de recuperación.....	56
Figura 4.2.2.4. Ecobalance para la operación de la turbina de vapor	57
Figura 4.2.2.5. Ecobalance para la operación del generador eléctrico.....	57

GRÁFICAS

Gráfica 3.2.2. Ejemplo de curva de carga (sur, invierno)	17
Gráfica 4.4.1. Impactos producidos en la generación de 1 kWh.....	65
Gráfica 4.4.2. Impactos producidos en la generación de 1 kWh.....	66
Gráfica 4.4.3. Impactos producidos en la generación de 1 kWh.....	67
Gráfica 4.4.4. Porcentaje de impactos entre plantas	68

1. INTRODUCCIÓN.

El motivo por el cual se decidió realizar el presente trabajo fue la inquietud de conocer las emisiones contaminantes producidas en una planta termoeléctrica convencional y una de ciclo combinado en la producción de energía eléctrica, para lo cual se propuso como objetivo principal realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para dichas plantas y comparar sus impactos ambientales aplicando la herramienta SimaPro.

SimaPro es un programa de cómputo que se basa en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida y, reporta los resultados de manera que se pueden observar y comparar los impactos ambientales producidos, en este caso, en la generación de electricidad de la termoeléctrica convencional y la de ciclo combinado.

La culminación de este trabajo aporta a la Facultad de Ingeniería un ejemplo de uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida aplicado en la evaluación de una planta termoeléctrica convencional y una planta de ciclo combinado realizado con la herramienta SimaPro; no obstante, cabe señalar que SimaPro no es la única herramienta que se basa en la metodología de ACV. Existen otros programas de cómputo como Umberto, Ecomanager y Repaq, mas sin embargo, se optó por utilizar SimaPro ya que es el programa con el que cuenta la Facultad.

Organización de la tesis.

En el segundo capítulo se explica el por qué del uso de la metodología de análisis de ciclo de vida, después se presentan datos relevantes como su aparición y desarrollo a través del tiempo, para dar paso a la definición de ACV y su correspondiente metodología.

En el tercer capítulo se da la definición de planta termoeléctrica y su clasificación, después, se explica de manera general su funcionamiento y componentes necesarios para su operación, también se enlistan algunos combustibles utilizados como el combustóleo y el gas natural, continuando así con la química de la combustión y el cálculo del poder calorífico, al final se muestran detalles de algunos equipos como el generador de vapor y la turbina tanto de vapor como de gas.

En el cuarto capítulo se aplica la metodología de Análisis de Ciclo de Vida a las plantas de ciclo combinado y termoeléctrica convencional en donde se presentan los impactos producidos por categoría y se describen brevemente para su interpretación.

En el quinto capítulo se presentan las conclusiones del trabajo. Después se presenta la bibliografía consultada y al final se encuentran los anexos en donde se detallan los cálculos realizados.

2. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.

2.1. ANTECEDENTES.

Todos los productos, procesos y servicios provocan impactos ambientales, consumen recursos, emiten sustancias al medio ambiente y generan modificaciones ambientales.

Actualmente, la creciente conciencia e importancia de la protección ambiental y los posibles impactos asociados con los productos, procesos y servicios, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar esos impactos. Uno de los métodos desarrollados es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología que facilita identificar estrategias para la prevención de la contaminación. Es de carácter sistémico y permite interpretar el desempeño ambiental de una unidad analizada en forma integral, tomando todos los impactos ambientales durante todo el ciclo de vida del producto.

La aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida permite obtener una definición de estrategias preventivas con mayor eficiencia y aprendizaje para entender las relaciones entre los diferentes elementos y procesos de cada etapa del ciclo de vida del producto, ya que identifica las oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos o servicios en las distintas etapas de su ciclo de vida, aportando información a quienes toman decisiones en la industria y organizaciones gubernamentales o no gubernamentales (ONG), seleccionando indicadores de desempeño ambiental, técnicas de medición y marketing.

Se debe tener en cuenta que el ACV sólo da información acerca de los impactos ambientales, no considera asuntos económicos ni sociales. Para la toma de decisiones se debe juntar esta información con la información proporcionada por el análisis de otros aspectos, como costos, conveniencia, y seguridad del consumidor.

Tabla 2.1. Aplicaciones del ACV.¹

Usuario	Uso interno	Uso externo
Compañías	<ul style="list-style-type: none"> • Conocer el ciclo de vida de sus productos. • Posicionar sus productos en el mercado. • Determinar prioridades para la planeación. • Diseño de productos. • Decisiones de compra. • Establecer estrategia empresarial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mercadotecnia (comparaciones). • Relaciones con autoridades. • Relaciones con accionistas
Autoridades públicas	<ul style="list-style-type: none"> • Apoyo para determinar políticas ambientales. (Prioridades, responsabilidades). • Decisiones de compra. 	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de ecosellos. • Información al público.
ONG	<ul style="list-style-type: none"> • Apoyo para determinar políticas ambientales. • Comparar productos en cuanto a su desempeño ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> • Presión/información a la industria. • Presión/información a consumidores.

¹ Fuente: UNEP. Life Cycle Assessment; what it is and how to to it, United Nations Publication, first edition, 1996.

2.2. HISTORIA.

La herramienta del ACV es relativamente moderna, ya que fue desarrollada en los años 60's, el primer estudio en este terreno fue desarrollado por Coca-Cola con el objetivo de analizar sus empaques de gaseosas en 1969.

Alemania fue uno de los países en donde se desarrollaron más casos de ACV debido al problema de desechos sólidos que tuvieron a comienzos de la década de 1980. En la segunda mitad de esa década el ACV se convirtió en una herramienta competitiva muy usada en áreas de producción y mercadotecnia.

Luego de varios años de investigación y desarrollo metodológico de varias instituciones, universidades y centros de investigación en Holanda, Alemania, Dinamarca y Estados Unidos, entre otros, en mayo de 1997, el grupo 5 del comité técnico ISO/TC 207 pasó la norma ISO 14040: Análisis del Ciclo de Vida, Principios y aplicaciones, la cual fue aprobada por 60 países.

Después de la aprobación de la norma, se creó en 2005 la oficina de Naciones Unidas para el medio ambiente, que impulsó a una red de trabajo para la promoción de la aplicación de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida en América Latina. Desde entonces varios grupos de trabajo en México, Colombia, Brasil, Costa Rica, Argentina, Perú y Chile realizan varias investigaciones.

El ACV es ahora la herramienta para la evaluación de perfiles ambientales de productos ya que posee un estándar internacional.

2.3. DEFINICIÓN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.

Análisis de Ciclo de Vida.²

“Recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida.”

El Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta de gestión ambiental que se basa en la evaluación del ciclo de vida de un producto o servicio, conforme a un conjunto sistemático de procedimientos de entradas y salidas de:

- Materias primas,
- Energía y
- Emisiones residuales

de modo que permitan identificar los impactos ambientales atribuibles al proceso o producto analizado, a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (“de la cuna a la tumba”).



Figura 2.3 Ciclo de vida³.

² Fuente: Norma UNE-EN ISO 14040:2006

³ Fuente: <http://www.solidworks.es/sustainability/life-cycle-assessment.htm>

2.4. METODOLOGÍA.

Los estudios de ACV se componen de cuatro fases:

- 1) **Definición del objetivo y alcance.** En esta primera fase se define el o los productos a ser analizados. Se escoge una unidad básica de comparación y se define el nivel de detalle necesario. El alcance, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, dependen del tema y del uso del estudio. La profundidad y amplitud dependen del objetivo.
- 2) **Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV).** En esta fase se elabora un inventario de los datos de entrada y salida en relación con el sistema bajo estudio. Implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido. La energía, las materias primas utilizadas, las emisiones a la atmósfera, agua y tierra, se cualifican para cada proceso.
- 3) **Evaluación de impactos.** En esta etapa se evalúan los resultados del análisis de inventario (entradas y salidas). Los efectos de la utilización de recursos y emisiones generales se agrupan y cuantifican en un número limitado de categorías de impactos ambientales, que luego se pasarán de acuerdo a su importancia.
- 4) **Interpretación de resultados.** Es la fase final del procedimiento de ACV, en la cual se resumen y discuten los resultados como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos. Los resultados se reportan de la manera más informativa posible.

La relación entre las fases se ilustra en la figura 2.4.

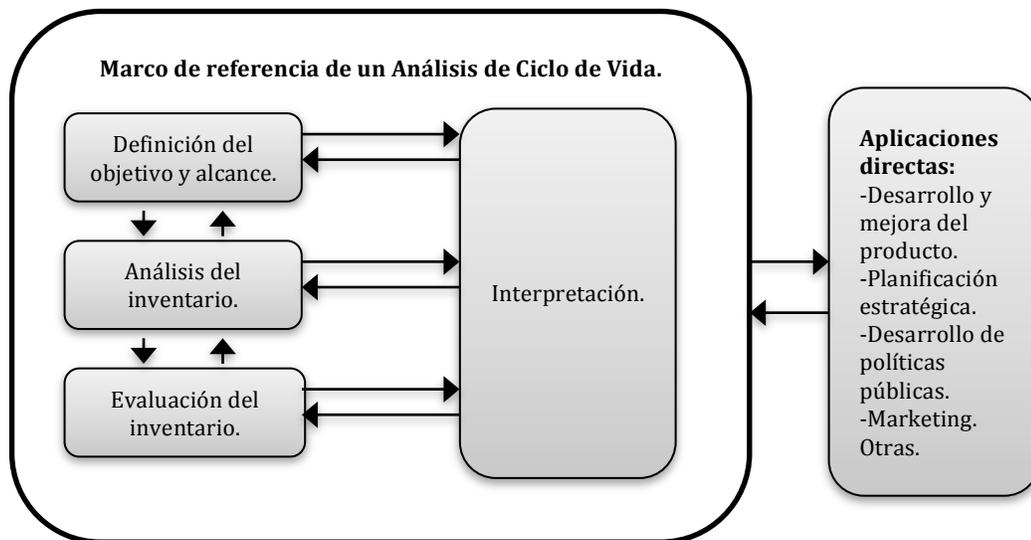


Figura 2.4 Fases de un ACV⁴.

⁴ Fuente: UNE-EN ISO 14040:2006

2.4.1. Definición del objetivo y el alcance.

El primer paso en la elaboración de un estudio de ACV es tener claro el motivo de por qué hacerlo. El motivo es la base para la definición del objetivo y el alcance del estudio. Se debe distinguir entre motivo y objetivo. El objetivo indica “hasta donde llegar” para “satisfacer” el motivo, establece la aplicación prevista, las razones para realizar el estudio y el público previsto. Algunos motivos para hacer un ACV pueden ser, por ejemplo, identificar estrategias de mejoramiento de procesos, determinar alternativas para la sustitución de un material, o definir alternativas para el manejo de desechos. El objetivo podría ser “Determinar las prioridades ambientales durante el ciclo de vida del producto X”. El motivo de estudio, “¿para qué se quieren utilizar los resultados del estudio?” es determinante para el alcance del proyecto. Estudios cuyos resultados se utilizan de manera interna para la orientación de estrategias de mejoramiento, o para tomar decisiones de compra, tendrán una profundidad menor que los estudios que son utilizados con objetivos comerciales y que incluyan un *peer review*⁵.

Una vez que el objetivo del ACV está claro, se define la base de cálculo para el estudio, que es la unidad funcional. La unidad funcional define la cuantificación de las funciones identificadas del producto, su función principal es proporcionar una referencia a la cual se relacionan las entradas y salidas para asegurar que los resultados del ACV son comparables. Todos los resultados al final del estudio van a estar relacionados con esta unidad funcional. En el caso de que se requiera una comparación entre dos sistemas diferentes, la definición de la unidad funcional se debe definir de manera crítica para llegar a obtener una comparación correcta.

Algunas unidades funcionales típicas son, por ejemplo, la distribución de 1,000 litros de agua mineral para envases de bebidas o 1,000 secadas de toallas de papel vs toallas de algodón. La unidad funcional se define a partir de las funciones que cumple el producto y depende del objetivo y alcance del ACV. Para lograr una definición de unidad funcional correcta, se siguen los siguientes pasos:

- Identificación de las funciones del producto.
- Selección de una función.
- Determinación de la unidad funcional.
- Identificación del desarrollo del producto.
- Determinación del flujo de referencia.

La unidad funcional es también una de las bases para la definición del alcance del ACV. El alcance debe de estar bien definido para asegurar que la amplitud, profundidad y nivel de detalle sean compatibles y suficientes para alcanzar el

⁵ *peer review*: Revisión de los resultados de un estudio de ACV por parte de un tercero con reconocimiento en el tema que puede asegurar la certeza de los resultados.

objetivo establecido. Fronteras importantes para la definición del alcance son las fuentes de información y el nivel de detalle de los datos a recolectar. Por definición, es necesario analizar todo el sistema desde la materia prima hasta el fin de vida. Sin embargo, el sistema completo se puede considerar en cinco subprocesos o en más de cien.

2.4.2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV).

El análisis del inventario del ciclo de vida consiste en la recopilación de datos y procesos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas de un sistema del producto. Este paso forma el corazón de la metodología y consume la mayor parte del tiempo para su desarrollo. La calidad de los resultados del estudio de ACV se relaciona directamente con la calidad y transparencia de los datos que se logren recolectar durante el inventario del ciclo de vida.

El análisis de inventario es un proceso iterativo. A medida que se recopilan los datos y se aprende más sobre el sistema, pueden aparecer nuevos requisitos o limitaciones, que requieran cambios en los procedimientos de recopilación de los datos, para que se puedan cumplir los objetivos del estudio. Algunas veces será recomendable modificar el objetivo o el alcance del estudio.

Los *ecobalances*⁶ dan la estructura para los diferentes tipos de datos que se buscan en la fase del inventario. En el cálculo de un ecobalance se especifican todas las entradas y las salidas (materia y energía) de un proceso específico.

Para el desarrollo del ecobalance se toma cada uno de los procesos u operaciones unitarias del ciclo productivo, como caja negra, determinando qué es lo que entra y qué es lo que sale de la misma. En la figura 2.4.2.1 se puede observar la estructura de un ecobalance.

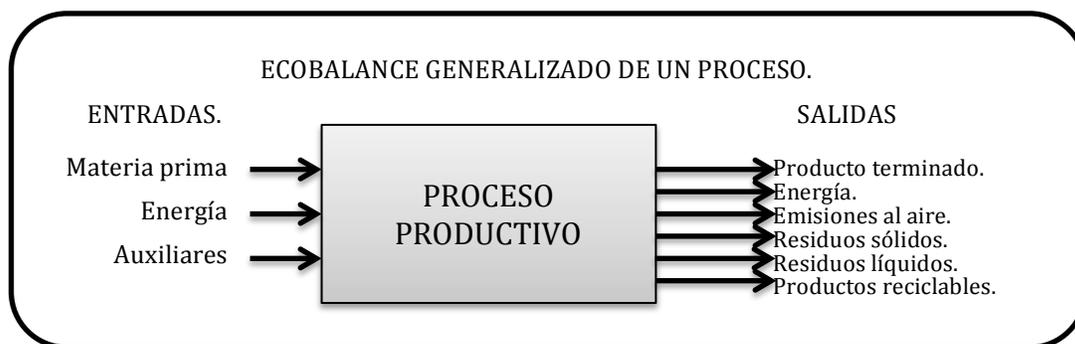


Figura 2.4.2.1. Ecobalance de un proceso productivo⁷.

⁶ Ecobalance: Es un método estructurado para reportar los flujos hacia el interior y el exterior, de recursos, materia prima, energía, productos, subproductos y residuos que ocurren en una organización en particular y durante un cierto período de tiempo.

⁷ Fuente: Elaboración propia.

Los datos de entradas y salidas considerados para cada proceso unitario (ecobalance) dentro de los límites del sistema y que forman la base del inventario del ciclo de vida son:

- **Materias primas.** Son los materiales que se transforman en el producto final del proceso. Se deben calcular todas las cantidades. Se debe distinguir entre materiales que tienen su destino en el producto final y materiales que se utilizan para los procesos de transformación.
- **Energía.** Se debe buscar información detallada de las cantidades de los diferentes tipos de energía y sus fuentes. Las entidades se expresan en MJ, por lo que para algunos tipos de energía se deben utilizar factores de conversión para el cálculo de la energía en MJ, se distingue entre fuentes renovables (energía hidroeléctrica) y no renovables (combustibles fósiles).
- **Auxiliares.** Son aquellos materiales que son necesarios en el proceso de transformación pero no forman parte del producto final. Estos materiales funcionan como facilitadores para el proceso.
- **Residuos sólidos.** Se busca información detallada sobre las cantidades y diferentes tipos de residuos sólidos. Los residuos sólidos se pueden categorizar en diferentes tipos como: residuos del proceso (materia prima sobrante, productos por fuera de las especificaciones; materiales que son necesarios para que el proceso funcione, como filtros, aceite, etc.); residuos de productos (productos en el fin de su vida útil); residuos de empaques (de materias primas o de componentes y para empacar el producto); y residuos diversos (como el polvo que se encuentra en los filtros).
- **Residuos líquidos.** Se busca información sobre las cantidades, concentraciones y diferentes tipos de vertimiento. Se debe distinguir entre soluciones y suspensiones. La mayor parte de los residuos líquidos salen al agua.
- **Residuos de gases.** Se busca información detallada sobre las cantidades y tipos de emisiones. La mayor parte de las emisiones ocurren como resultado de procesos como la combustión de combustibles fósiles para la producción de energía, el uso de solventes, y el uso o la producción de productos volátiles.
- **Producto terminado.** Producto principal del proceso de transformación. Este puede ser un producto terminado, un subproducto o un material refinado. Todas las cantidades de los otros componentes del ecobalance se relacionan con este producto final.

Los ecobalances de todos los procesos forman el Análisis de Ciclo de Vida, los ecobalances de todas las etapas del ciclo de vida forman en su conjunto el árbol de procesos.

En la figura 2.4.2.2 se muestra un ejemplo de árbol de procesos.

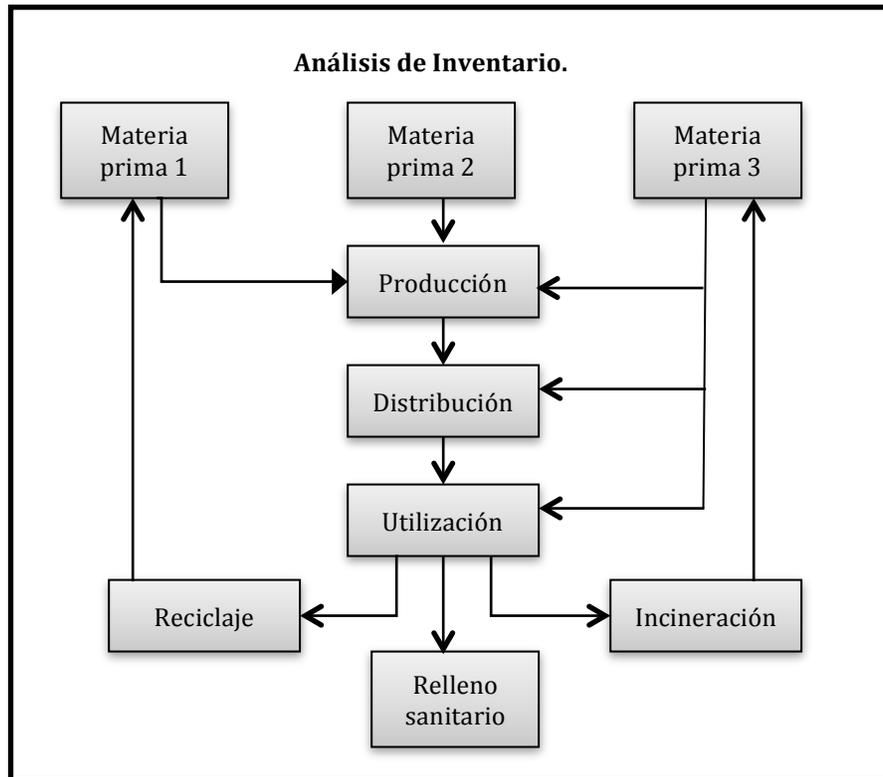


Figura 2.4.2.2. Árbol de procesos ACV.⁸

El tiempo o el presupuesto pueden limitar la obtención de datos específicos para todos los procesos del ciclo de vida. Algunos manuales y estudios anteriores pueden ayudar en la recolección de los datos. Posibles fuentes para la recolección de los datos son los siguientes:

- **Empresa:** experiencia de los trabajadores, cuentas de energía, etiquetas de productos, informes históricos (control de calidad, administración), agua, máquinas, órdenes, licencias, listados de especificaciones, diseños.
- **Proveedores:** experiencia de los trabajadores, cuentas, etiquetas de productos/materiales, informes sobre los productos/materiales.
- **Clientes:** experiencias de usuarios, informes.

⁸ Fuente: B. V. Hoof, N. Monroy, A. Saer. Producción más limpia: paradigma de gestión ambiental. Ed. Alfaomega, México, (2008)

- **Competidores:** experiencia de los trabajadores, etiquetas e informes sobre los productos y materiales.
- **Literatura:** manuales, artículos, Internet.
- **Instituciones:** gremios, ministerios, autoridades ambientales, consultorías.
- **Estudios anteriores:** base de datos de SimaPro.
- **Estimaciones por medio de expertos.**

La confidencialidad de los datos puede ser un problema, especialmente cuando se quiere utilizar la información del ACV en el ámbito público. Para obtener información se puede firmar un acuerdo confidencial escrito para obtener los datos de los proveedores, garantizando que no se podrá rastrear la información proporcionada por éstos.

Puede ocurrir que no existan datos para todas las unidades de proceso identificadas. En este caso, se pueden buscar datos de procesos similares, o realizar juicios expertos para obtener alguna información aproximada de entradas y salidas del proceso. Estos vacíos de información deben ser documentados y la influencia de la falta de datos debe dejarse abierta, o debe ser llenada a través del planteamiento de supuestos serios, o aplicación de técnicas de análisis de sensibilidad.

Se debe de tratar de trabajar con datos de alta calidad. Pero no existe un procedimiento común para realizar un análisis de calidad de la información en el ACV. Sin embargo, deben tenerse en cuenta los siguientes indicadores de calidad de información para cada grupo de datos:

- Tiempo de vigencia.
- Cubrimiento geográfico.
- Vigencia tecnológica.
- Precisión (medida de la variabilidad de los valores de los datos).
- Cobertura (porcentaje de locaciones que reportan información del número potencial de existencias para cada categoría de datos en el proceso unitario).
- Representatividad (Análisis cualitativo del grado hasta el cual el lote de información refleja el verdadero interés de la población).

El análisis de inventario debe describir y simular el modelo particular del sistema del producto, luego permitir la adquisición de los datos requeridos y los cálculos de las figuras de entrada y salida para el sistema en sí, o para cualquier otro subsistema definido.

2.4.3. Evaluación de impactos.

El propósito de esta fase es “traducir” los diferentes impactos (emisiones, materias primas, energía, etc.) calculados en la fase de inventario, en uno(s) ecoindicador(es) integral(es). Para este fin es necesario calcular el efecto que tienen estos impactos sobre los problemas ambientales.

La interpretación de los impactos ambientales hace indispensable la clasificación de los problemas para obtener una unidad de expresión de los impactos; sin embargo, cualquier clasificación de los problemas es una limitante. La crisis ambiental está conformada por diferentes problemas ambientales interrelacionados. Desde el punto de vista, la interpretación correcta de los problemas ambientales se hace de manera holística. Bajo esta perspectiva, el propósito de la metodología de ACV es buscar la mejor aproximación a la realidad. La figura 2.4.3 muestra como es que se caracterizan los problemas con la metodología CLM.

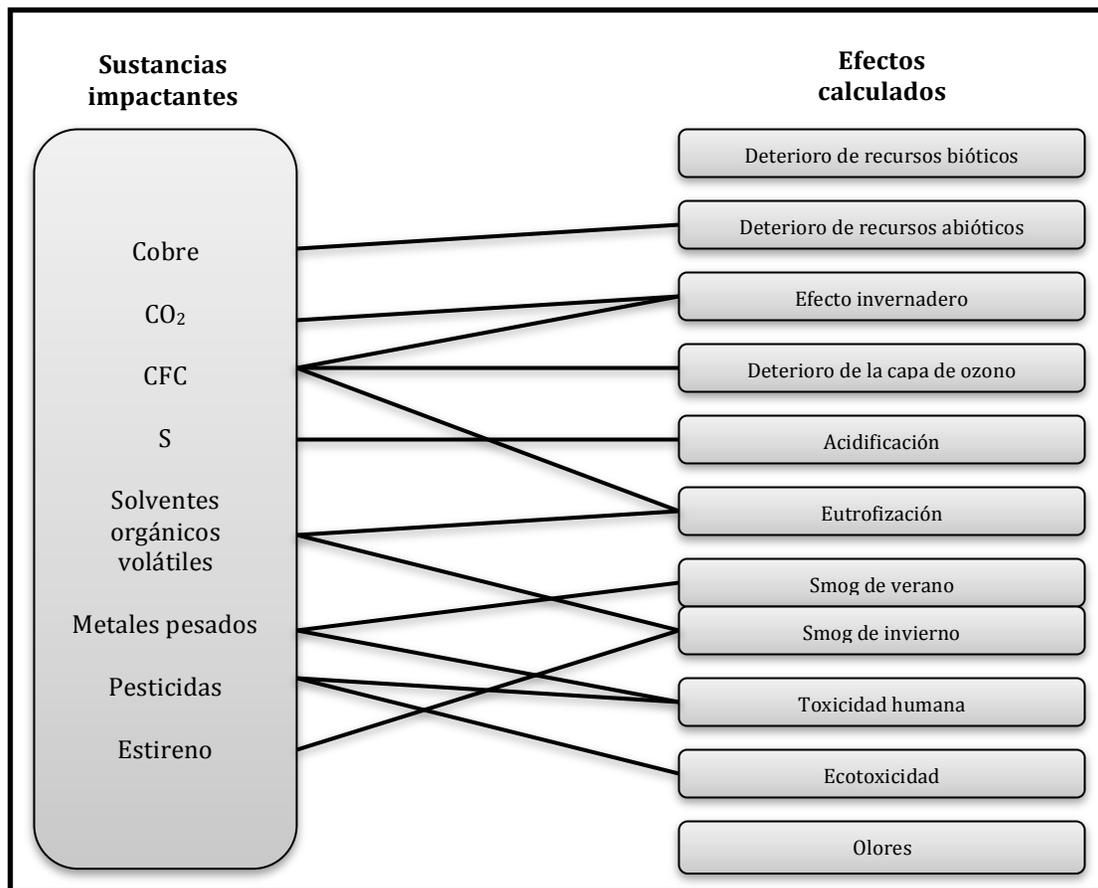


Figura 2.4.3. Estructura de la caracterización y problemas estándar⁹.

⁹ Fuente: B. V. Hoof, N. Monroy, A. Saer. Producción más limpia: paradigma de gestión ambiental. Ed. Alfaomega, México, (2008)

Para llegar, de estas 11 categorías (problemas ambientales) propuestas, a un indicador “global” se aplica una evaluación, por paneles de expertos, para determinar la importancia de las categorías supuestas. Allí es donde se centran las críticas a los diferentes modelos de one-score por ser modelos de carácter subjetivo. Existen diferentes modelos reconocidos para la asignación de datos para diferentes categorías. Uno de los más utilizados es de CML de la universidad de Leiden, Holanda, al lado de modelos desarrollados en Alemania, Suiza y Dinamarca.

Por su carácter completo y específico, los diferentes modelos de asignación se trabajan con software especializado. Por esto, para la mayoría de los practicantes de ACV este paso de la asignación es como una caja negra.

2.4.4. Interpretación de resultados.

El paso de interpretación compila toda la información obtenida en los pasos anteriores del ACV para formar en juicio final. El resultado del ACV solamente ofrece un apoyo a la decisión y es, por tanto, parte del proceso de toma de decisiones; adicionalmente podría ser necesario utilizar otras herramientas. Por su puesto todos los aspectos no ambientales (sociales, económicos, etc.) también deben ser considerados como parte del proceso de toma de decisiones.

La interpretación debe de ser consistente con las metas y el alcance propuesto y con los resultados obtenidos. La validez de los datos usados debe ser verificada, lo cual incluye al menos el conocimiento sobre la exactitud y la calidad de la base de datos. Los hallazgos en la fase de interpretación deben reflejar el resultado de cualquier análisis de sensibilidad y de incertidumbre que esté presentado. Los resultados deben también tomar en consideración que¹⁰:

- La naturaleza de las selecciones y supuestos hechos es subjetiva. Las conclusiones deben ser enmarcadas con respecto a los límites establecidos para el sistema, la fuente de datos seleccionada y las categorías de impacto escogidas.
- Los resultados del ACV muestran impactos potenciales.
- La precisión y confiabilidad de los resultados están afectadas por la calidad de los datos utilizados (ausencia de datos, agregación, promedios, referencias regionales).
- El tiempo y el alcance del estudio dependen del personal y los recursos financieros disponibles.
- La misma interpretación incluye pasos de valoración y éstos introducen criterios subjetivos y no científicos.

¹⁰ UNEP. Life Cycle Assessment; what it is and how to do it, United Nations Publication, first edition, 1996.

3. ANTECEDENTES DE PLANTAS TERMOELÉCTRICAS.

3.1. DEFINICIÓN DE PLANTA TERMOELÉCTRICA.

Una central termoeléctrica es una instalación empleada en la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada en forma de calor, proveniente normalmente de la combustión de combustibles fósiles como petróleo, gas natural o carbón.

El proceso de generación de energía eléctrica es el siguiente:

- a) La energía contenida en el combustible se transforma por combustión en energía calorífica.
- b) La energía calorífica es absorbida por el fluido de trabajo y se convierte, al expandirse en una turbina o motor, en energía mecánica.
- c) La energía mecánica es transformada en energía eléctrica a través de un generador eléctrico.

3.2. TIPOS DE PLANTAS TERMOELÉCTRICAS.

3.2.1. Tipos de plantas según el servicio que brindan:

3.2.1.1. Plantas para servicio público.

Son las grandes plantas termoeléctricas con combustibles fósiles, con capacidades de 25 a 1,250 MW.

3.2.1.2. Plantas para servicio privado.

Son aquellas plantas termoeléctricas para autoabastecimiento o Cogeneración¹¹, con combustibles fósiles o biomasa con capacidades desde 0.25 y hasta 500 MW.

3.2.2. Tipos de plantas para cubrir la demanda.

Las plantas se pueden clasificar por su factor de planta¹², en plantas de “carga base”, plantas de “carga intermedia” y plantas de “carga de punta”.

¹¹ Cogeneración: es la producción secuencial y simultánea de energía eléctrica o mecánica y de energía térmica aprovechable en los procesos industriales a partir de una misma fuente energética.

¹² Factor de planta: se define como la razón de la capacidad media operativa entre la capacidad máxima (nominal) en un periodo de tiempo dado, o bien, la razón entre la energía eléctrica producida en un periodo dado y el producto de la capacidad máxima por el número de horas del periodo.

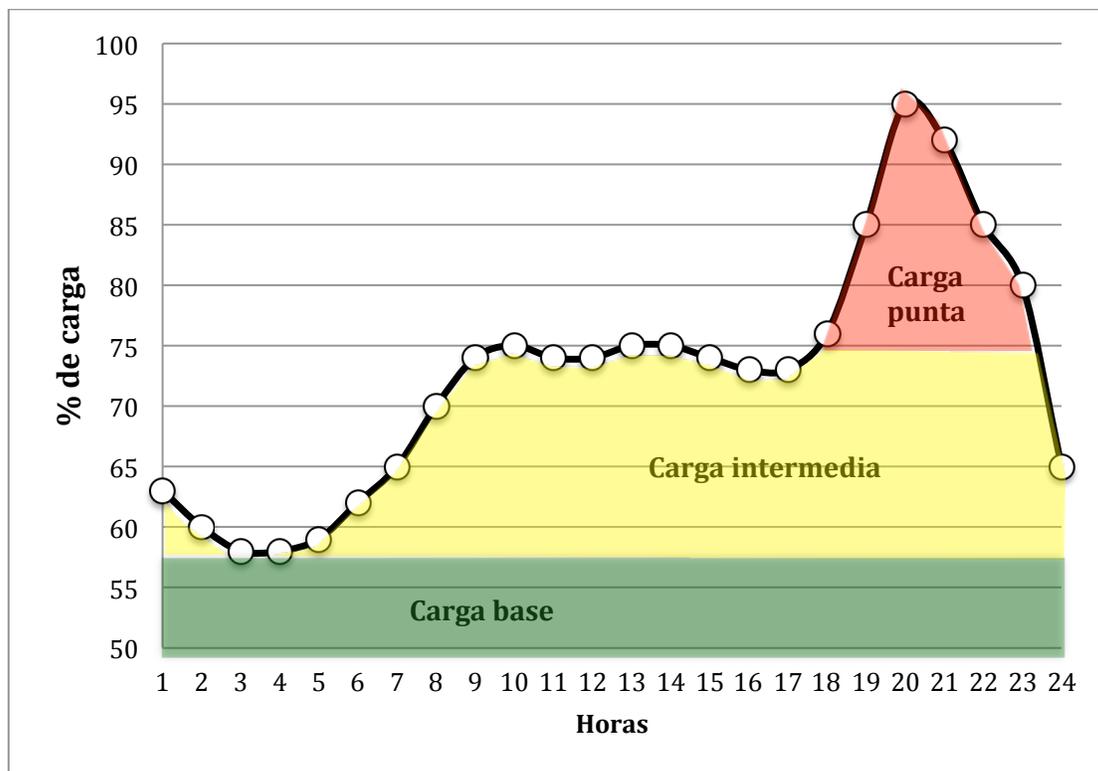
$$F.P. = \frac{\text{energía eléctrica producida [kwh]}}{\text{capacidad máxima neta [kw]} \times \text{horas del periodo [h]}} \times 100[\%].$$

3.2.2.1. Plantas de “carga base”. Son aquellas con más de 5,000 horas de operación por año, son las plantas nucleares, las de ciclo combinado de gran capacidad, las carboeléctricas, las de vapor con alta eficiencia (recalentamiento y regenerativas), y las hidroeléctricas.

3.2.2.2. Plantas de “carga Intermedia”. Aquellas de 2,000 a 5,000 horas de operación por año que trabajan en horario diario parcial (8AM a 10PM o similar), se pueden apagar de noche o fines de semana, si esto fuera económico. Son las plantas de vapor de baja eficiencia (sin recalentamiento), las de ciclo combinado de media capacidad.

3.2.2.3. Plantas de “Carga de Punta”. Con menos de 2,000 horas de operación anual, pueden arrancar y parar varias veces en un día, son las plantas de motores, las turbinas de gas, las plantas viejas de vapor y las hidroeléctricas de almacenamiento de agua.

La Gráfica 3.2.2. muestra un ejemplo de curva de carga y el despacho de carga base , intermedia y punta.



Gráfica 3.2.2. Ejemplo de curva de carga (sur, invierno).¹³

La Tabla 3.2.2. muestra los tipos de plantas de generación eléctrica y sus principales parámetros.

¹³ Fuente: CONUEE. Información básica de control de demanda eléctrica, 2007.

Tabla 3.2.2. Tipos de plantas termoeléctricas para cubrir la demanda¹⁴.

Central	Número de unidades	Capacidad por unidad (MW)		Eficiencia (%)		Régimen térmico (kJ/kWh)		Vida útil (años)	Factor de planta	Usos propios (%)
		1_ ¹⁵	Bruta	Neta	Bruta	Neta	Bruta			
Termoeléctrica convencional	2	350.00	337.30	39.56	38.13	9,100	9,443	30	0.750	3.6
	2	160.00	153.76	36.39	34.97	9,892	10,294	30	0.650	3.9
	2	84.00	80.61	32.45	31.14	11,095	11,562	30	0.650	4.0
2_ ¹⁶ Turbogás aeroderivada gas	1	41.59	41.04	36.69	36.21	9,812	9,943	30	0.125	1.3
	1	102.79	100.90	39.25	38.53	8,171	9,343	30	0.125	1.8
2_ _/ Turbogás industrial gas	1	84.77	83.76	29.45	29.10	12,222	12,370	30	0.125	1.2
	1F	186.61	184.52	33.49	33.11	10,750	10,872	30	0.125	1.1
	1G	258.44	255.49	34.89	34.49	10,317	10,436	30	0.125	1.1
2_ _/ Turbogás aeroderivada diesel	1	39.15	38.52	37.16	36.56	9,689	9,847	30	0.125	1.6
2_ _/ Ciclo Combinado gas	1F X 1	283.36	277.06	50.58	49.45	7,118	7,280	30	0.800	2.2
	2F X 1	569.73	556.59	50.94	49.76	7,067	7,234	30	0.800	2.3
	3F X 1	853.32	834.22	50.89	49.75	7,075	7,237	30	0.800	2.2
	1G X 1	372.02	364.57	51.22	50.20	7,028	7,172	30	0.800	2.0
	2G X 1	753.82	738.28	51.53	50.47	6,986	7,133	30	0.800	2.1
3_ _/ ¹⁷ Combustión interna	1	42.20	40.53	44.25	42.50	8,136	8,470	25	0.650	39.0
	2	18.40	17.05	43.73	40.52	8,232	8,884	20	0.650	7.3
	3	3.60	3.27	37.81	34.38	9,521	10,472	20	0.650	9.1
Carboeléctrica	2	350.00	324.79	37.87	35.15	9,505	10,243	30	0.800	7.2
Carb. Supercrítica c/desulf.	1	700.00	625.56	43.09	38.50	8,356	9,350	30	0.800	10.6
Nuclear	1	1400.00	1351.00	34.92	33.70	10,309	10,683	60	0.900	3.5
Geotermoeléctrica										
Cerro Prieto	4	26.95	24.97	19.02	17.62	18,927	20,427	30	0.850	7.3
Los Azufres	4	26.60	24.98	18.30	17.18	19,672	20,949	30	0.850	6.1

¹⁴ Fuente: COPAR. Generación, 2011.

¹⁵ 1__/ Número de unidades por cada central o número de turbinas de gas y modelo de éstas (F o G) por cada turbina de vapor (1x1, 2x1 o 3x1).

¹⁶ 2__/ Potencia y eficiencia en condiciones ISO: Temperatura ambiente 15°C, humedad relativa de 60% y presión atmosférica al nivel del mar.

¹⁷ 3__/ Potencia y eficiencia en condiciones ISO 15550:2002; ISO 3046-1:2002: Temperatura ambiente 25°C, humedad relativa de 30% y presión barométrica de 1.0 bar.

3.3. COMPONENTES PRINCIPALES DE CENTRALES TERMOELÉCTRICAS.

Las centrales termoeléctricas se componen principalmente de una caldera o generador de vapor, una turbina de vapor, un condensador de superficie, una torre de enfriamiento, un generador eléctrico y una subestación elevadora, también se utilizan equipos auxiliares, tales como bombas, ventiladores, etc.

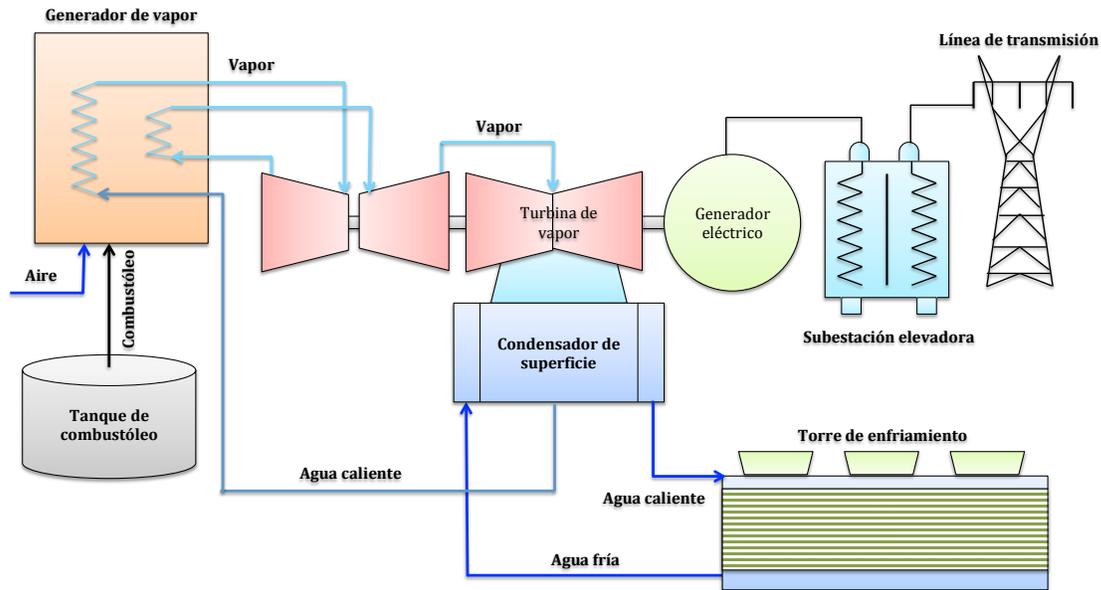


Figura 3.3. Esquema de una planta termoeléctrica¹⁸.

La figura 3.3. muestra un ejemplo de planta termoeléctrica en el que el vapor necesario para el funcionamiento de la turbina, se produce en la caldera, el vapor se conduce por medio de tuberías hasta la turbina de vapor, donde el vapor se expande para producir trabajo mecánico, que es transformado en energía eléctrica por el generador.

3.4. COMPONENTES PRINCIPALES DE CICLOS COMBINADOS CON TURBINAS DE GAS.

Una planta de ciclo combinado es aquella en la que la energía térmica del combustible es transformada en electricidad mediante el acoplamiento de dos ciclos termodinámicos individuales, uno que opera a alta temperatura y otro con menores temperaturas de trabajo. El calor residual del proceso de generación de trabajo neto en el ciclo de alta temperatura se aprovecha, en su mayor parte, en un intercambiador de calor, para producir trabajo en un ciclo termodinámico de baja temperatura.

¹⁸ Fuente: COPAR. Generación, 2011.

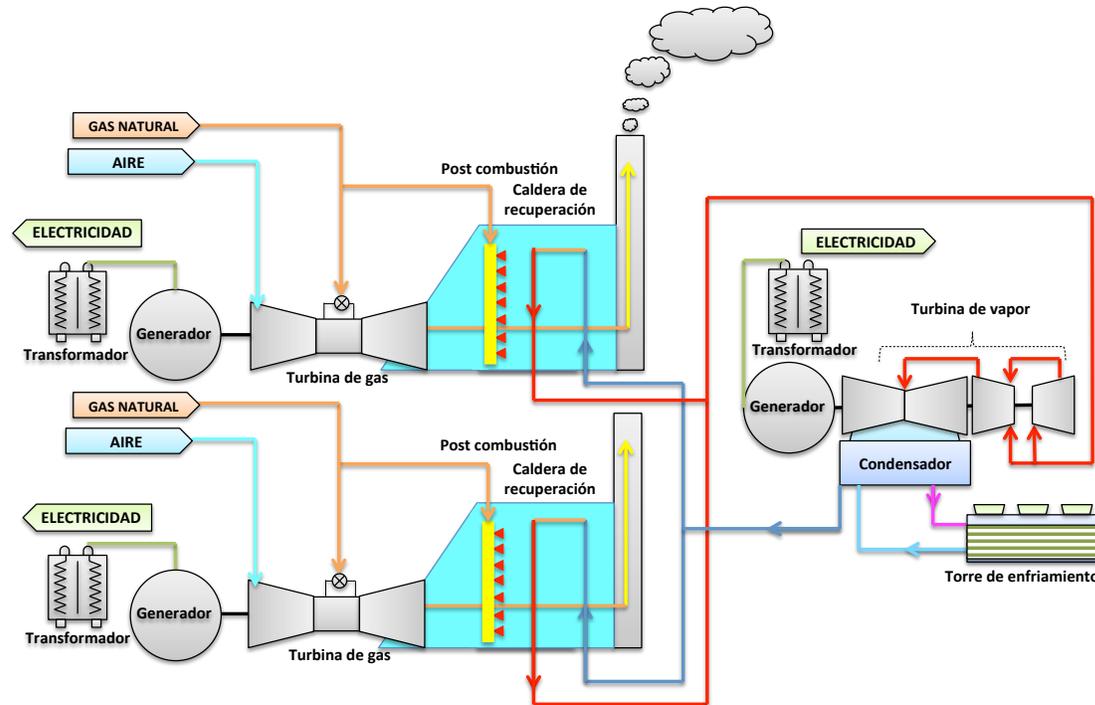


Figura 3.4. Esquema de una planta de ciclo combinado 2x1.¹⁹

Los componentes principales de una planta de ciclo combinado, básicamente, son la turbina de gas, la caldera de recuperación, la turbina de vapor, el generador y los sistemas auxiliares.

El ciclo combinado utiliza dos ciclos termodinámicos, el Brayton y el Rankine, que trabajan con fluidos diferentes: gas y vapor de agua. El ciclo Brayton opera a mayor temperatura que el Rankine y ambos están conectados por un intercambiador de calor (caldera de recuperación.)

3.5. COMBUSTIBLES PARA PLANTAS TERMOELÉCTRICAS.

Los combustibles más empleados en la generación son:

- **Gas natural (seco):** Gas natural no asociado a pozos de petróleo, es decir, gas seco.
- **Derivados del petróleo:** Gas natural asociado, diesel, gas LP, combustóleo y coque de petróleo.
- **Sólidos y gases residuales de procesos:** Carbón, gas de alto humo, gas pobre de procesos petroquímicos, CO de procesos, gas de gasificación de carbón y del coque de carbón.
- **Biomasa:** Bagazo de caña, sorgo, maíz, madera, desechos agrícolas y forestales, basura.

¹⁹ Fuente: Elaboración propia.

3.5.1. Gas natural.

Es el combustible fósil más limpio, fácilmente manejable, con menores emisiones de contaminantes. En lo general, contiene de un 88 a un 96% de metano, de 3 a 12% de etano y trazas de azufre.

Debido a que el gas natural es suministrado de diversas fuentes (proceso, pozos, importación y GNL). La calidad del gas natural presenta una problemática en su uso como combustible y/o materia prima por su variabilidad en el contenido energético.

A continuación en la Tabla 3.5.1 se presentan las especificaciones del gas natural en México:

Tabla 3.5.1. Especificaciones del gas natural en México.²⁰

Propiedad	Unidades	Zona Sur			Resto del País
		Hasta el 31 de diciembre de 2010	Del 1 de enero de 2011 al 31 de diciembre de 2012	A partir del 1 de enero de 2013	
Metano (CH ₄)-Min	% vol	NA	NA	83.00	84.00
Oxígeno (O ₂)-Max	% vol	0.20	0.20	0.20	0.20
Bióxido de Carbono (CO ₂)-Max.	% vol	3.00	3.00	3.00	3.00
Nitrógeno (N ₂)-Max.	% vol	9.00	8.00	6.00	4.00
Nitrógeno -Variación máxima diaria	% vol	±1.5	±1.5	±1.5	±1.5
Total de inertes (CO ₂ y N ₂)-Max.	% vol	9.00	8.00	6.00	4.00
Etano (C ₂ H ₆)-Max.	% vol	14.00	12.00	11.00	11.00
Temperatura de rocío de hidrocarburos-Max.	K (°C)	NA	271.15 (-2)	271.15 (-2)	271.15 (-2)
Humedad (H ₂ O)-Max.	mg/m ³	110.00	110.00	110.00	110.00
Poder calorífico superior-Min.	MJ/m ³	35.30	36.30	36.80	37.30
Poder calorífico superior-Max.	MJ/m ³	43.60	43.60	43.60	43.60
Índice de Wobbe ²¹ -Min.	MJ/m ³	45.20	46.20	47.30	48.20
Índice de Wobbe-Max.	MJ/m ³	53.20	53.20	53.20	53.20
Índice de Wobbe-Variación máxima diaria	%	±5	±5	±5	±5
Acido sulfhídrico (H ₂ S)-Max.	mg/m ³	6.00	6.00	6.00	6.00
Azufre total (S)-Max.	mg/m ³	150.00	150.00	150.00	150.00

²⁰ Fuente: NOM-001-SECRE-2010, Especificaciones del gas natural.

²¹ Índice de Wobbe (NOM-001-SECRE-2010): La relación del poder calorífico superior (Hs) por unidad de volumen con respecto a la raíz cuadrada de la densidad relativa (ρ_r) según la siguiente formula: $W = H s / \sqrt{\rho r}$

3.5.2. Combustóleo.

Es el combustible más sucio, pero con el poder calorífico mayor de los hidrocarburos.

Con relación a su poder calorífico es el más barato, pero tiene graves inconvenientes, tales como su alta viscosidad, su alto contenido de azufre y sedimentos y el contenido de Vanadio (150 a 350 ppm) que es dañino a los metales.

El contenido máximo de azufre de cualquier combustóleo, por ley no debe exceder a un 4% en peso en toda la República Mexicana. En zonas metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, se prohíbe su uso (NOM-085-ECOL-1994).

En lo general tiene un 84% de carbono, 10% hidrógeno, 3 a 4% de azufre y de 0.1 a 2.8% de agua y sedimentos. Su gravedad específica es de 0.97 a 0.99 y su poder calorífico superior es de 41,800 a 43,100 MJ por kg.

A continuación, en la Tabla 3.5.2., se presentan las especificaciones del combustóleo mexicano y del crudo Maya despuntado:

Tabla 3.5.2. Análisis y propiedades fisicoquímicas de un combustóleo y del crudo Maya despuntado²².

Determinación	Combustóleo	Crudo Maya despuntado
Poder calorífico bruto [cal/g]	10157	10203
Poder calorífico neto [cal/g]	9599	9632
Azufre % en peso	3.39	3.71
Carbón conradson % en peso	16.0	12.57
Cenizas % en peso	0.065	0.050
Gravedad específica @ 60/60 °F	0.9990	0.9550
Tensión superficial @ 60 oC. Dinas/cm	30.9	29.5
Carbono % en peso	84.81	84.33
Hidrógeno % en peso	10.93	11.18
Nitrógeno % en peso	0.20	0.36
Oxígeno % en peso	0.21	0.37
Viscosidad s.s.f. @ 50°F	502	93
Insolubles en NC ₅ % en peso	14.12	15.19
Temperatura de inflamación p.m. °C	102	35
Agua por destilación % vol.	0.4	0.1
Agua y sedimento % vol.	0.45	0.50

²² Fuente: Uso de crudo Maya despuntado como combustible alternativo al combustóleo, Víctor M. Salinas B., Antonio Diego M. Y Jesús Porcayo C.

3.6. PRINCIPIOS DE COMBUSTIÓN.

El proceso de combustión es un conjunto de reacciones químicas exotérmicas (desprenden **energía** en forma de calor y luz) que ocurren al combinarse en condiciones adecuadas de temperatura y tiempo, los elementos **combustibles** (carbono, hidrógeno, azufre) y el **comburente** (oxígeno).

La reacción de combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o bien con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno, siendo el aire atmosférico el más habitual.



La reacción del combustible con el oxígeno origina sustancias gaseosas, entre las cuales, las más comunes son CO_2 y H_2O . Llamadas **productos**, humos o gases de combustión. El combustible sólo reacciona con el oxígeno y no con el nitrógeno contenido en el aire. Sin embargo, el nitrógeno del aire reacciona con el oxígeno también del aire en una reacción de oxidación endotérmica.

3.6.1. Tipos de combustión.

De acuerdo a como se produzcan las reacciones de combustión, éstas pueden ser de distintos tipos:

Combustión completa. Ocurre cuando las sustancias combustibles reaccionan hasta el máximo grado posible de oxidación. En este caso no habrá presencia de sustancias combustibles en los productos o humos de la reacción.

Combustión incompleta. Se produce cuando no se alcanza el grado máximo de oxidación y hay presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de la reacción.

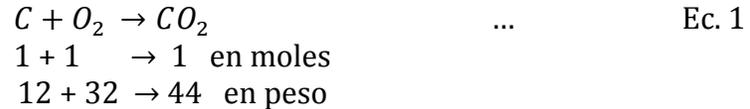
Combustión estequiométrica o teórica. Es la combustión que se lleva a cabo con la cantidad mínima de aire para que no existan sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión no hay presencia de oxígeno en los humos, debido a que este se ha empleado íntegramente en la reacción.

Combustión con exceso de aire. Es la reacción que se produce con una cantidad de aire superior al mínimo necesario. Cuando se utiliza un exceso de aire, la combustión tiende a no producir sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión es típica la presencia de oxígeno en los gases de combustión.

Combustión con defecto de aire. Es la reacción que se produce con una menor cantidad de aire que el mínimo necesario. En este tipo de reacción, es característica la presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de reacción.

3.6.2. Química de la combustión:

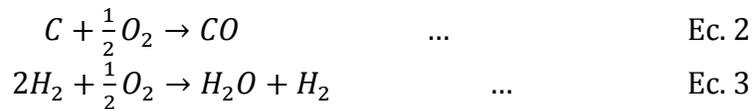
De acuerdo con los fundamentos de la química, la unión de carbono y oxígeno se expresa de la siguiente forma:



Las expresiones anteriores indican que 1 peso molecular de carbono se combina con 1 peso molecular de oxígeno para producir 1 peso molecular de dióxido de carbono. Un mol de una sustancia vale M kilogramos cuando M es el peso molecular.

La Ec. 1, corresponde a la oxidación completa (combustión completa) del carbono.

La combustión incompleta se da debido a la presencia de óxido de carbono y de hidrógeno libre en los productos finales.



El Oxígeno necesario para la combustión es captado generalmente del aire atmosférico, el cual contiene gran cantidad de nitrógeno y otros compuestos. Es por eso que es necesario conocer las propiedades y composición del aire ya que es la principal fuente de oxígeno. La tabla 3.6.2 nos muestra la composición del aire seco.

Tabla 3.6.2. Composición del aire seco.²³

Compuesto	% en volumen, moles.	% en peso.	Peso molecular, kg por mol
Oxígeno (O ₂)	20.99	23.19	31.9988
Nitrógeno (N ₂)	78.03	75.47	28.0134
Argón	0.94	1.30	39.9480
Dióxido de carbono (CO ₂)	0.03	0.04	44.0100
Hidrógeno (H ₂)	0.01	0.00	2.0159
Aire seco	100.00	100.00	28.9670

Para efectos de cálculo, se supone que **el aire está constituido por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, en volumen** y por 23.2% de oxígeno y 76.8% de nitrógeno, en peso.

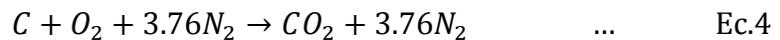
²³ Fuente: Motores de combustión interna y compresores. Víctor Ávila Alvarado, Heriberto Eliezer Cruz Jácome.

La cantidad de vapor de agua contenido en el aire varía ampliamente con la temperatura y con el porcentaje de saturación, pero se puede calcular con ayuda de una carta psicométrica, si se conocen las temperaturas de bulbo húmedo y seco.

La relación molar entre el nitrógeno y oxígeno del aire es la misma que su relación volumétrica, debido a que ambos son gases y se encuentran a la misma temperatura; por tanto, se tendrá:

$$\frac{\text{moles } N_2}{\text{moles } O_2} = \frac{79\%}{21\%} = 3.7619$$

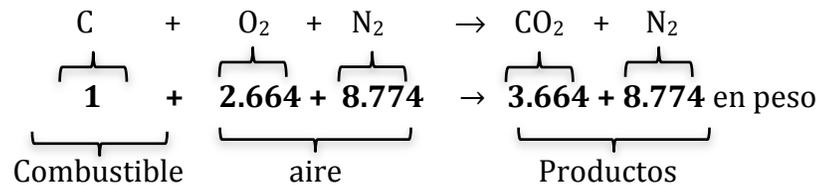
La combustión del carbono en el aire está representada por la siguiente ecuación:



$$1 + 1 + 3.76 \rightarrow 1 + 3.76 \quad \text{en moles}$$

$$12 + 32 + 3.76(28.2) \rightarrow 44 + 3.76(28.2) \quad \text{en peso}$$

Dividiendo entre 12.



Por tanto, el aire requerido será:

$$(2.664 + 8.774)/1 = \mathbf{11.44} \text{ kg}_{\text{aire}} \text{ por kg de C}$$

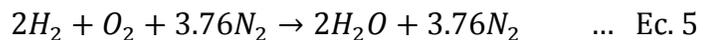
del cual:

$$\begin{array}{l} \mathbf{2.664} \text{ kg. son de } O_2 \text{ y,} \\ \mathbf{8.774} \text{ kg. son del } N_2 \end{array}$$

Además se emiten:

$$\begin{array}{l} \mathbf{3.66} \text{ kg. de } CO_2 \text{ por kg de C y,} \\ \mathbf{8.774} \text{ kg. de } N_2 \text{ por kg de C.} \end{array}$$

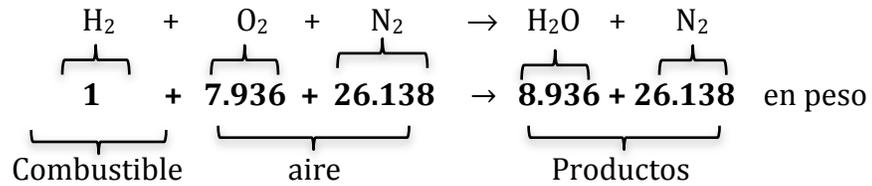
La combustión del hidrógeno en el aire está representada por la siguiente relación:



$$2 + 1 + 3.76 \rightarrow 2 + 3.76 \quad \text{en moles}$$

$$2(2) + 32 + 3.76(28.2) \rightarrow 2(18) + 3.76(28.2) \quad \text{en peso}$$

Dividiendo entre 4.



Por tanto, el aire requerido será:

$$(7.936 + 26.138)/1 = \mathbf{34.07} \text{ kg}_{\text{aire}} \text{ por kg de H}_2.$$

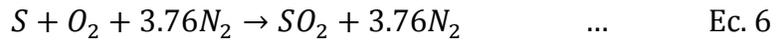
del cual:

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{7.936} \text{ kg. son de O}_2 \text{ y,} \\
 \mathbf{26.138} \text{ kg. son del N}_2
 \end{array}$$

Además se emiten:

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{8.936} \text{ kg. de H}_2\text{O por kg de H}_2 \text{ y,} \\
 \mathbf{26.138} \text{ kg. de N}_2 \text{ por kg de H}_2.
 \end{array}$$

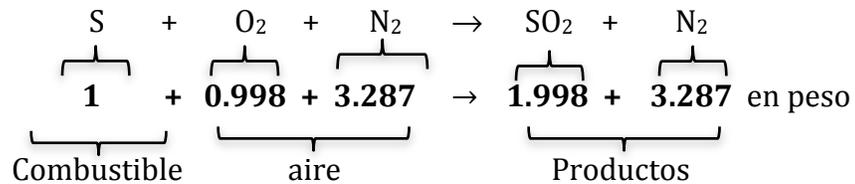
La combustión del azufre en el aire está representada por la siguiente relación:



$$1 + 1 + 3.76 \rightarrow 1 + 3.76 \quad \text{en moles}$$

$$(32) + 32 + 3.76(28.2) \rightarrow 2(64) + 3.76(28.2) \text{ en peso}$$

Dividiendo entre 32.



Por tanto, el aire requerido será:

$$(0.998+3.287)/1 = \mathbf{4.28} \text{ kg}_{\text{aire}} \text{ por kg de S}$$

del cual:

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{0.998} \text{ kg. son de O}_2 \text{ y,} \\
 \mathbf{3.287} \text{ kg. son del N}_2
 \end{array}$$

Además se emiten:

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{1.998} \text{ kg. de SO}_2 \text{ por kg de S y,} \\
 \mathbf{3.287} \text{ kg. de N}_2 \text{ por kg de S.}
 \end{array}$$

3.6.3. Poder calorífico.

Es la cantidad de calor que entrega un kilogramo, o un metro cúbico, de combustible al oxidarse en forma completa.

El poder calorífico de un combustible puede ser:

1. Poder Calorífico Superior (PCS) = Higher Heating Value (HHV).
2. Poder Calorífico Inferior (PCI) = Lower Heating Value (LHV).

1. Poder calorífico superior.

Se denomina poder calorífico bruto o superior PCS (en inglés HHV) al total de la energía liberada en un proceso de combustión 100% completa, de las reacciones químicas exotérmicas que ocurren al combinarse en condiciones adecuadas de temperatura y tiempo, los elementos combustibles (carbono, hidrógeno, azufre) y el comburente (oxígeno).

2. Poder calorífico inferior.

El poder calorífico neto o inferior PCI (en inglés LHV) es la energía disponible después de restarle al PCS las pérdidas por la energía empleada en la evaporación del agua libre en el combustible y agua formada del componente H₂ del combustible.

3.6.3.1. Relación entre los poderes caloríficos.

$$PCI = PCS - 597 \times G \quad \dots \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

PCI = Poder calorífico Inferior [kcal / kg_{comb}]

PCS = Poder calorífico Superior [kcal / kg_{comb}]

597 = Calor de condensación del agua a 0 °C [kcal / kg_{agua}]

G = Porcentaje en peso del agua formada por la combustión del H₂ más la humedad propia del combustible [kg_{agua} / kg_{comb}]

$$G = 9H + H_2O \quad \dots \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

9 : Son los kilos de agua que se forman al oxidar un kilo de hidrógeno.

H : Porcentaje de hidrógeno contenido en el combustible.

H₂O : Porcentaje de humedad del combustible.

Por la tanto la ecuación anterior queda:

$$PCI = PCS - 597 \times (9H + H_2O) \quad \dots \quad \text{Ec. 9}$$

3.6.3.2. Determinación del poder calorífico.

El poder calorífico de un cuerpo compuesto es igual a la suma de los poderes caloríficos de los elementos simples que lo forman, multiplicados por la cantidad centesimal en que intervienen, descontando de la cantidad de hidrógeno total del combustible la que se encuentra ya combinada con el oxígeno del mismo.

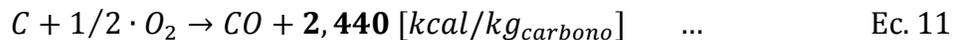
Es necesario efectuar previamente un “análisis elemental” del combustible cuyo poder calorífico deseamos determinar (%C, %H, %O₂, %S, %H₂O).

Poder calorífico del carbono.

La reacción química de la combustión completa del carbono es:



Si el oxígeno disponible para la combustión no fuera suficiente, entonces:



Poder calorífico del hidrógeno.

1. poder calorífico superior.

La reacción química completa del hidrógeno es:



$$PCS = 34,400 [kcal/kg_{hidrógeno}]$$

2. Poder calorífico inferior.

Para obtener el poder calorífico inferior del hidrógeno se le debe restar el agua formada al oxidar el H₂ y su humedad.

$$PCI = PCS - 600 \times (9H + H_2O) \quad \dots \quad \text{Ec. 13}$$

Considerando:

H₂O = 0 si es que no existe humedad en el combustible.

H = 1 kg hidrógeno.

Resulta:

$$PCI = 34,400 - 600 \times 9$$

$$PCI = 34,400 - 5,400$$

$$PCI = 29,000 [kcal/kg_{hidrógeno}]$$

Poder calorífico del azufre.

El azufre libera calor de acuerdo a la siguiente reacción química.

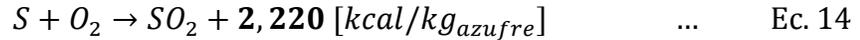


Tabla 3.6.3.2. Reacciones químicas comunes en la combustión y su energía liberada²⁴.

Combustible	Reacción	Calor de combustión (Poder calorífico Superior)
Carbón a CO	$2C+O_2 \rightarrow 2CO$	2,440 [kcal/kg]
Carbón a CO ₂	$C+O_2 \rightarrow CO_2$	8,140 [kcal/kg]
Hidrógeno	$2H_2+O_2 \rightarrow 2H_2O$	34,400 [kcal/kg]
Azufre a SO ₂	$S+O_2 \rightarrow SO_2$	2,220 [kcal/kg]
Metano	$CH_4+2O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O$	13,264 [kcal/kg]
Acetileno	$2C_2H_2+5O_2 \rightarrow 4CO_2+2H_2O$	11,945 [kcal/kg]
Etileno	$C_2H_4+3O_2 \rightarrow 2CO_2+2H_2O$	12,020 [kcal/kg]
Etano	$2C_2H_6+7O_2 \rightarrow 4CO_2+6H_2O$	12,403 [kcal/kg]
Sulfuro de hidrógeno	$2H_2S+3O_2 \rightarrow 2SO_2+2H_2O$	3,944 [kcal/kg]

3.6.3.3. Poder calorífico de un compuesto (fórmula de Dulong.)

Por el principio de conservación de la energía, el físico DULONG expresa el poder calorífico de un combustible que contenga carbono, hidrógeno y azufre en su composición, como:

Poder calorífico superior de un combustible seco.

$$PCS = 8.140 \times \%C + 34.400 \times (\%H - \%O/8) + 2.220 \times \%S \quad \dots \quad \text{Ec. 15}$$

Poder calorífico inferior de un combustible seco.

$$PCI = 8,140 \times \%C + 29,000 \times (\%H - \%O/8) + 2,220 \times \%S \quad \dots \quad \text{Ec. 16}$$

Poder calorífico inferior de un combustible húmedo.

$$PCI = 8,140 \times \%C + 29,000 \times (\%H - \%O/8) + 2,220 \times \%S - 600 \times H_2O \quad \dots \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

%C : Porcentaje de carbono en peso por kilogramo de combustible.

%H : Porcentaje de hidrógeno en peso por kilogramo de combustible.

²⁴ Fuente: Elaboración propia.

%O : Porcentaje de oxígeno en peso por kilogramo de combustible.

%S : Porcentaje de azufre en peso por kilogramo de combustible.

%O/8 : Porcentaje de hidrógeno en peso que se encuentra combinado con el oxígeno del mismo combustible dando “agua de combinación”.

(H-%O) : Porcentaje de “hidrógeno disponible” en peso realmente disponible para que se oxide con el oxígeno del aire, dando “agua de formación”.

Tabla 3.6.3.3. Poder calorífico de los combustibles.²⁵

Combustible	unidad	MJ	kWh	BTU	kcal
Combustóleo domestico	l	41.68	11.58	39,518.95	9,958.78
	gal	157.79	43.83	149,595.24	37,698.00
	bbl	6,627.25	1,840.92	6,283,000.00	1,583,316.00
Combustóleo empresas eléctricas USA	l	41.71	11.59	39,544.11	9,965.12
	gal	157.89	43.86	149,690.48	37,722.00
	bbl	6,631.46	1,842.09	6,287,000.00	1,584,324.00
Gas natural doméstico	m3	36.84	10.23	34,926.02	8,801.36
	ft3	1.04	0.29	989.00	249.23
Gas natural empresas eléctricas USA	m3	38.18	10.61	36,197.34	9,121.73
	ft3	1.08	0.30	1,025.00	258.30
Diesel doméstico	l	38.69	10.75	36,675.95	9,242.34
	gal	146.44	40.68	138,833.33	34,986.00
	bbl	6,150.48	1,708.48	5,831,000.00	1,469,412.00
Diesel empresas eléctricas USA	l	38.65	10.73	36,638.22	9,232.83
	gal	146.29	40.64	138,690.48	34,950.00
	bbl	6,114.15	1,706.73	5,825,000.00	1,467,900.00
Carbón doméstico	kg	18.50	5.14	17,539.00	4,419.83
	lb	8.39	2.33	7,955.64	2,004.82
Carbón importado en Petacalco (1% de S)	kg	26.28	7.30	24,912.24	6,277.88
	lb	11.92	3.31	11,300.12	2,847.63
Uranio enriquecido	g	4,017.70	1,116.04	3,809,000.00	959,868.00
Vapor geotérmico Cerro prieto	ton	2,780.10	772.31	2,635,812.81	664,165.89
Vapor geotérmico Los Azufres	ton	2,764.90	768.09	2,621,401.69	660,534.61

²⁵ Fuente: COPAR, Generación 2011.

3.7. GENERADORES DE VAPOR.

El generador de vapor comúnmente llamado “Caldera” es un conjunto de sistemas, cuya finalidad es la producción de vapor o agua caliente a presión, mediante el aprovechamiento de la energía liberada en la combustión.

3.7.1. Clasificación.

3.7.1.1. Por su nivel de presión:

- **Baja.** Aquellas que producen vapor a baja presión, entre 4 y 5 [bar].
- **Media.** Producen vapor saturado aproximadamente a 20 [bar].
- **Alta.** Producen vapor desde 20 [bar] hasta presiones cercanas a la crítica.
- **Supercrítica.** Son calderas que trabajan con presiones superiores a la crítica: presión igual o mayor a 221 [bar] y 374 [°C]

3.7.1.2. Por su tipo de circulación del agua.

- **Circulación natural.** Con presiones de hasta 125 [bar]. El agua circula por convección natural por el interior de los tubos del hogar y los gases pasan a través de los bancos de tubos.
- **Circulación forzada.** Con presiones mayores a 125 [bar]. La circulación del agua se apoya en bombas de recirculación.

3.7.1.3. Por su tipo de circulación dentro de los tubos.

- **Las acuatubulares (Tubos de agua).** Por dentro de los tubos circula el agua y la mezcla de agua y vapor. Por fuera, generalmente en flujo cruzado, intercambian calor los humos productos de la combustión. Producen normalmente vapor sobrecalentado y pueden ser aplicables para plantas generadoras de energía eléctrica, además de aplicaciones en los sectores industrial y comercial.

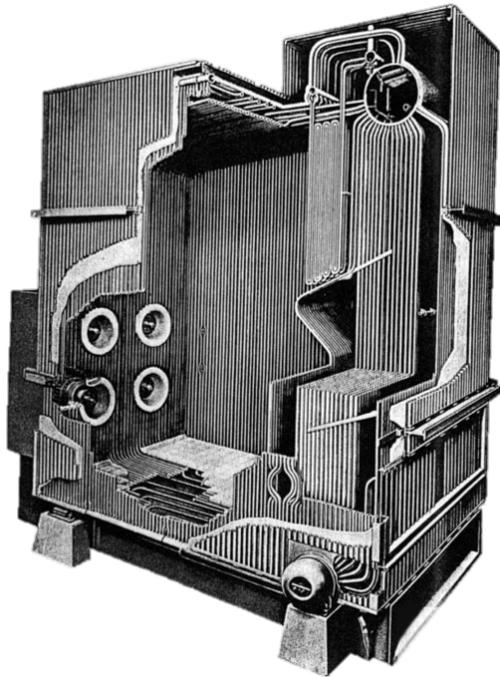


Figura 3.7.1.3.1. Caldera acuotubular.²⁶

- **Las Piro-tubulares (Tubos de Humo).** En estas calderas son los humos de la combustión los que circulan por dentro de los tubos mientras que el agua se calienta y evapora en el exterior de ellos. Este tipo de Caldera no es aplicable para plantas generadoras, ya que el vapor que producen no es sobrecalentado.

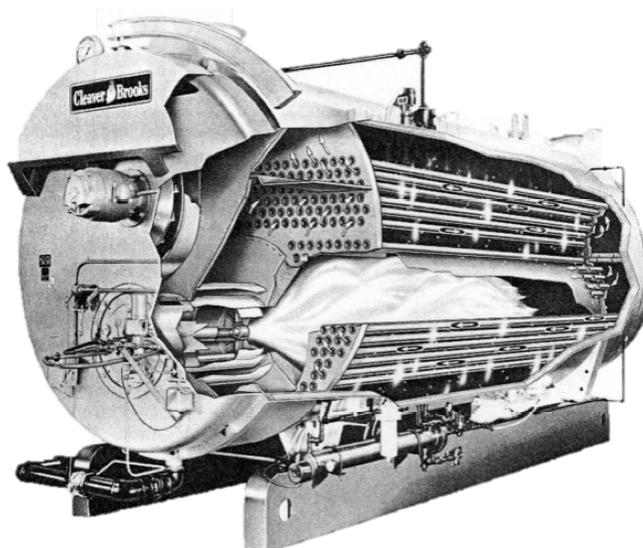


Figura 3.7.1.3.2. Caldera piro-tubular²⁷.

²⁶ Fuente: UDELAR, Facultad de Ingeniería. Generadores de vapor.

²⁷ Fuente: <http://deshidratadora.blogspot.com/2011/04/caldera.html>

3.7.1.4. Por su tipo de servicio.

- **Calderas comerciales (Paquete).** Equipos que producen agua caliente o vapor para su uso en el sector comercio.

Se entregan totalmente ensambladas y probadas en fábrica.

Su tamaño máximo se limita únicamente por restricciones de peso y espacio durante el transporte. Ejemplos de estas calderas son las mostradas en las figuras 3.7.1.3.1 y 3.7.1.3.2.

- **Calderas industriales.** Equipos que producen vapor para aplicaciones en el sector industrial y para plantas generadoras.

Estas calderas son para ensamblarse en sitio, son modulares y su grado de prefabricación es muy alto.

- **Calderas para grandes plantas generadoras de energía eléctrica.** Existen modelos definidos por fabricantes pero también se diseñan específicamente caso por caso. Para centrales generadoras, pueden existir las calderas convencionales, para quemar combustibles líquidos o gaseosos y para quemar carbón y diseños especiales para quemar, coque de carbón o de petróleo, biomasa y basura. Normalmente se ensamblan en el sitio.

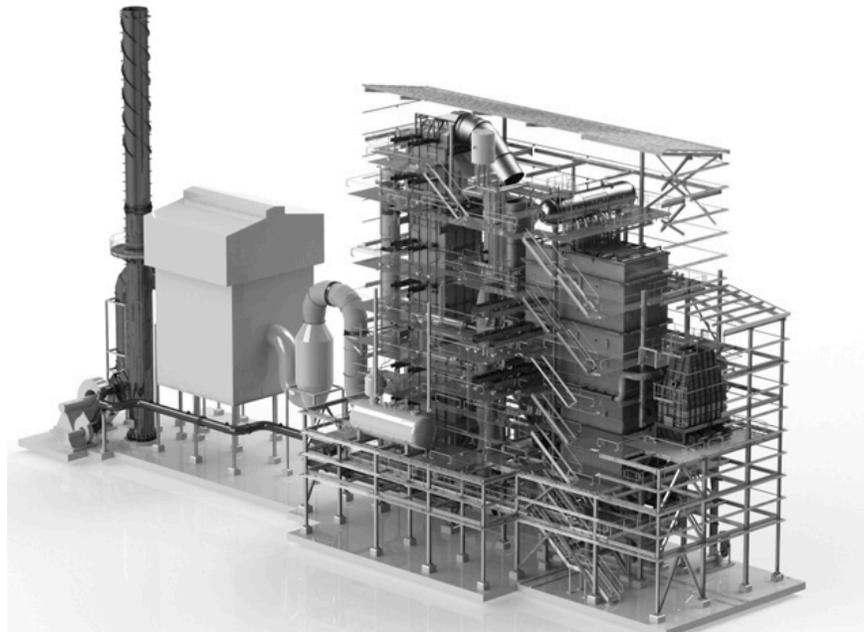


Figura 3.7.1.3.3. Caldera para termoeléctrica.²⁸

²⁸ Fuente: <http://www.expobioenergia.com>

- **Calderas de recuperación.**

El aprovechamiento de calor de gases residuales industriales y de las Turbinas de Gas, se realiza en este tipo de calderas. Son de diseño modular, están totalmente probados en fábrica. Cada módulo viene con su marco estructural y no requieren de soporte inferior.

Pueden tener hasta 3 niveles de presión y pueden incluirse módulos de evaporación con sus domos, economizadores, sobrecalentadores o recalentadores.

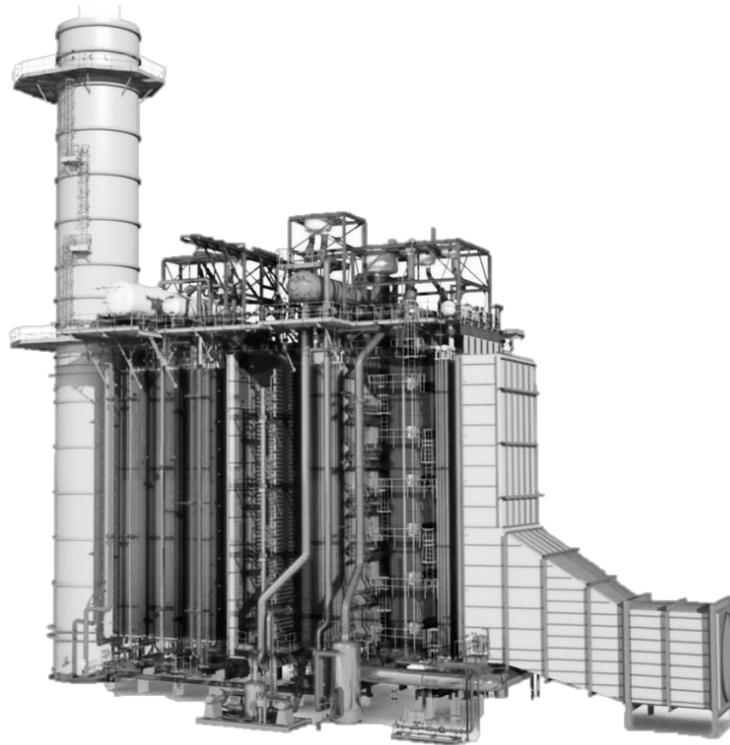


Figura 3.7.1.3.4. Caldera de recuperación.²⁹

²⁹ Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/alstom-power-generation/generadores-vapor-recuperacion-calor-29644-1044377.html>

3.7.2. Componentes principales de un generador de vapor.

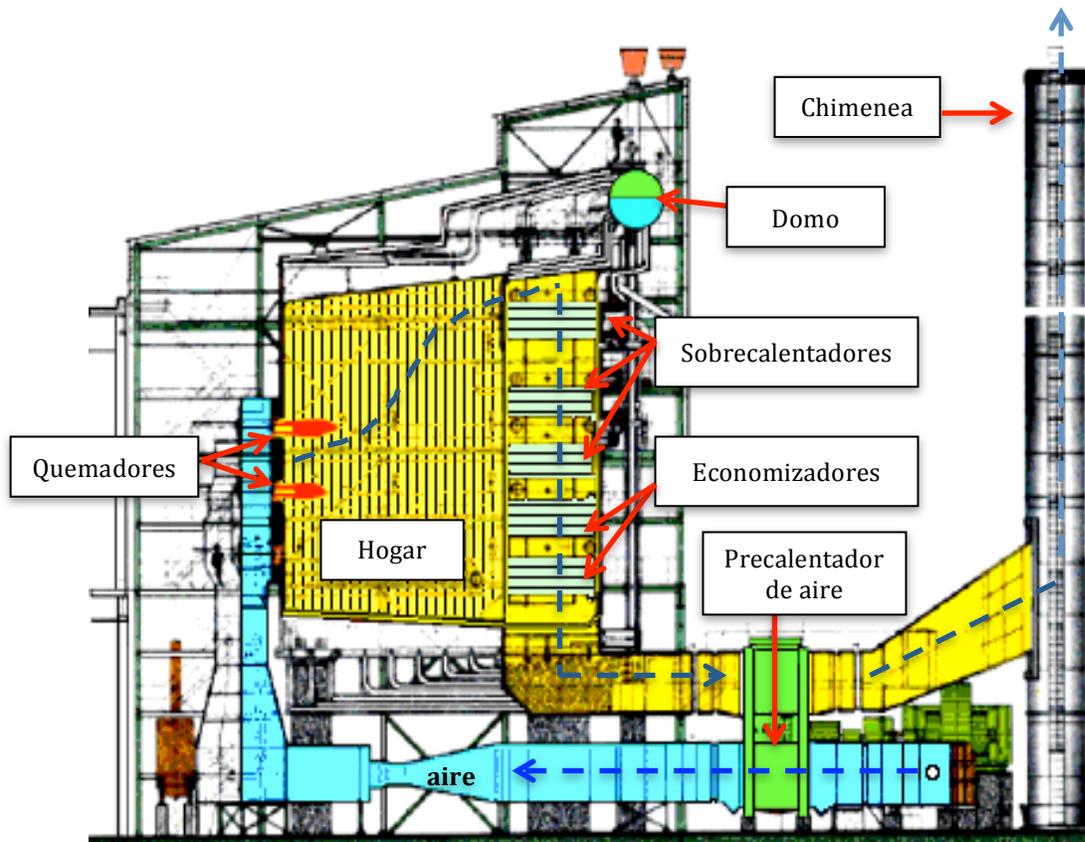


Figura 3.7.2. Componentes caldera de vapor para planta termoeléctrica.³⁰

- **Hogar.** Es el espacio donde se produce la combustión, por lo que existe flama y energía radiante. Es la encargada de contener la llama de los quemadores e iniciar el intercambio de energía por radiación.
- **Domo.** Es de forma cilíndrica, en su interior contiene agua y vapor. Tiene las siguientes funciones:
 - Distribuye el volumen de agua adecuada para evitar que los tubos queden secos o con poco flujo.
 - Recibe los tubos evaporadores y descarga a los tubos de agua.
 - Recibe la dosificación de químicos para limpieza de lodo.
 - Proporciona una salida de muestreo.
 - Separa el vapor saturado del agua y lo seca.

³⁰ Fuente: Centrales térmicas. Pedro Fernández Díez.

- **Economizadores.** Son aquellos elementos que se instalan en la salida de gases de las calderas para aumentar su rendimiento. Están formados por tubos lisos o con aletas, por el interior de dichos tubos circula el agua de alimentación a la caldera y por fuera de los tubos los gases de la combustión a contracorriente. Dichos gases ceden su energía al agua aumentando su temperatura y siendo necesario menor consumo de energía para producir vapor, esto mejora la eficiencia de la Caldera al requerir menos combustible.
- **Recalentadores o Sobrecalentadores.** Son equipos compuestos por serpentines de tubos instalados en las zonas de mayor temperatura de la caldera. Exceptuado su instalación en la cámara de combustión, generalmente están dispuestos justo detrás de la pared de membrana y después de la cámara de combustión. Su función es elevar la temperatura del vapor saturado que pasa a través de su interior, produciendo vapor sobrecalentado o vapor recalentado a una temperatura superior a la de saturación.

Pre calentadores de aire. En calderas de Plantas generadoras de energía es común el incluir pre calentadores de aire en el flujo de salida de los gases (antes de la chimenea) para aprovechar la energía de los mismos, para calentar el aire de admisión a los quemadores. Su configuración es cilíndrica formada por segmentos radiales tipo "V", que contienen placas planas. El cilindro tiene movimiento circular lo que permite que en un segmento pasen los gases y cedan energía a las placas, las que al girar ceden esta energía al aire que entra a contra flujo.

- **Quemadores.** Los quemadores son los equipos donde se realiza la combustión, deben lograr una buena mezcla de aire y combustible y además proporcionar la energía de activación. Está formado de una serie de componentes que permiten la regulación de aire y combustible y regulación de flama distribuyéndola en el Hogar.

Para quemar combustibles líquidos, estos se comprimen con bombas o se atomizan con aire comprimido o vapor.

En Calderas industriales y centrales eléctricas la temperatura inicial de flama y los gases radiantes son del orden de 1,250 a 1,550 °C. Esto establece condiciones base para el diseño, ya que predominara la transferencia de calor ya sea por radiación o por transferencia de calor por convección.

3.7.3. Calidad del agua en las calderas.

Al utilizar agua-vapor como fluido se exige la alta calidad de su alimentación a la Caldera, limitando los sólidos totales y la dureza, para prevenir las incrustaciones en los tubos de la misma y arrastre a la turbina de vapor. Esta dureza e incrustaciones, si no se atienden adecuadamente, pueden ser uno de los problemas principales en la operación.

Las impurezas pueden ser del tipo coloidal, entre ellas se encuentran el sílice, los sulfuros y las grasas o impurezas disociadas electrolíticamente como gases disueltos, iones o grupos de iones (Na, Ca, Fe, Cl, etc.)

Aún en concentraciones pequeñas en la evaporación en la caldera se producen líquidos saturados en sales y se pueden producir arrastre que se pueden depositar en los tubos del hogar o en los tubos del sobrecalentador, incrustaciones aislantes, dificultando el enfriamiento de los tubos con agua o el vapor, pudiendo crearse situaciones con peligro de explosión.

Dureza. Es la característica más peligrosa e indica el contenido de calcio y magnesio en el agua que puede ser transitoria, que son solubles (bicarbonatos de calcio y de magnesio) o dureza permanente que se precipitan como sólidos (cloruros, nitratos y sulfatos de calcio y magnesio) y producen incrustaciones

3.7.4. Materiales.

ASME en su código de calderas 1508 sección I, especifica entre otras condiciones, que el valor del esfuerzo de partes sujetas a presión no debe ser mayor a una cuarta parte del esfuerzo permisible del material a la temperatura de operación de las calderas.

Para tubos del Hogar y Economizadores se pueden emplear materiales con contenido medio de carbono que permiten temperaturas máximas del metal hasta 450 °C o materiales con 0.5% MO que permite temperaturas de hasta 480 °C.

Para los tubos de los sobrecalentadores con temperaturas de metal de hasta 550 °C se emplean aleaciones de 1.25% Cr y 0.5% Mo como es el SA 213 T11 y para hasta 590 °C el SA 213 T22 con 2.25% Cr y 1% Mo.

Para temperaturas mayores a 590 °C se emplean aceros inoxidables con Cromo y Níquel (SA 213 TP-304H 18% Cr - 8%Ni y SA TP-321H con 18%Cr - 10% Ni).

3.8. TURBINAS DE VAPOR.

Una turbina de vapor es una turbomáquina motora, que transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el vapor y el eje, el cual cuenta con álabes que tienen una forma particular para poder realizar el intercambio energético.

Las turbinas de vapor están presentes en diversos ciclos de potencia, entre éstos, el más importante es el Ciclo Rankine, el cual primeramente genera el vapor en una caldera a gran temperatura y presión, después en la turbina se transforma la energía interna del vapor en energía mecánica que es aprovechada por un generador para producir electricidad.

En una turbina se pueden distinguir dos partes, el rotor y el estator. El rotor está formado por ruedas de álabes unidas al eje que constituyen la parte móvil de la turbina. El estator también está formado por álabes, no unidos al eje sino a la carcasa de la turbina.

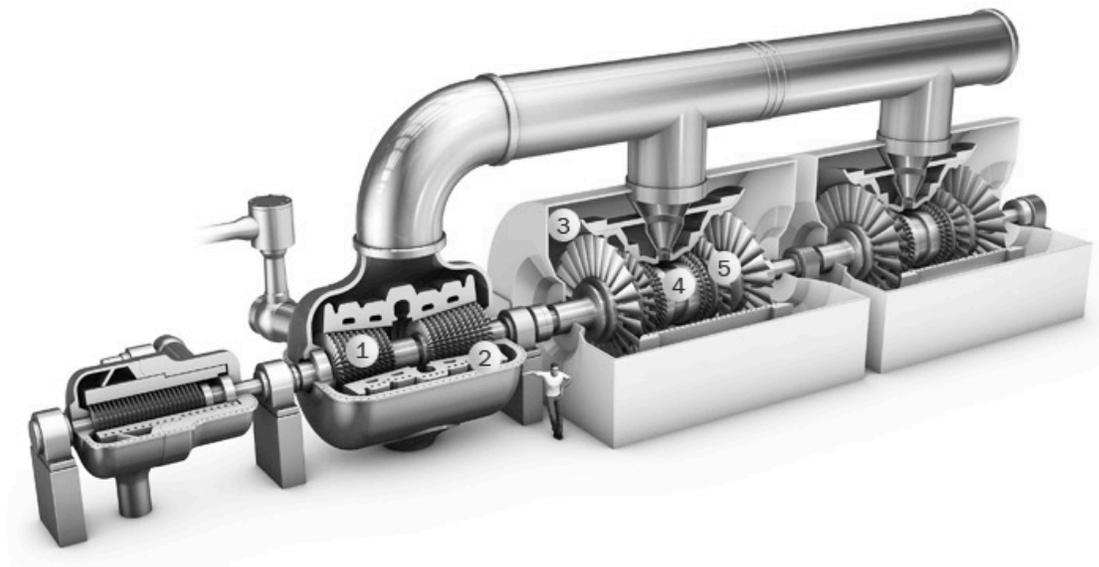


Figura 3.8.1. Turbina de vapor.³¹

El funcionamiento de la turbina de vapor se basa en la conversión de energía térmica y cinética en trabajo en un proceso isoentrópico no reversible en las toberas y en los álabes de la turbina.

³¹ Fuente: http://www.sandvik.coromant.com/es-es/industrysolutions/condensing_power/steam_turbines/pages/default.aspx

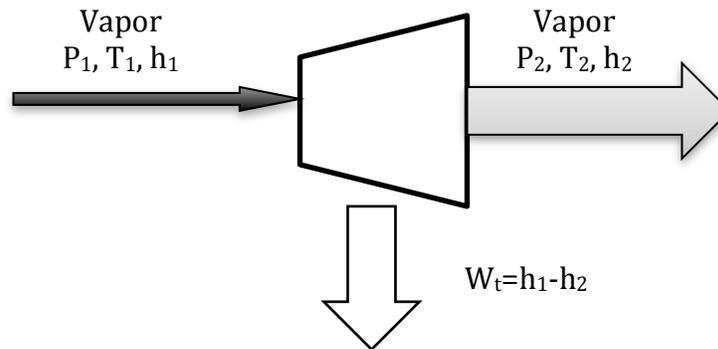


Figura 3.8.2. Esquema básico de una turbina de vapor.³²

3.8.1. Clasificación.

Existen las turbinas de vapor en una gran variedad de tamaños, desde unidades de 1 HP (0.75 kW) usadas para accionar bombas, compresores y otro equipo accionado por flecha, hasta turbinas de 2,000,000 HP (1,500,000 kW) utilizadas para generar electricidad.

Es común clasificarlas de acuerdo a su grado de reacción:

Turbinas de acción: En estas turbinas la expansión del vapor es realizada en los álabes directores o en las toberas de inyección, que se encuentran sujetos al estator. En el paso del vapor por el rotor la presión se mantiene constante y hay una reducción de la velocidad.

Turbinas de reacción: En estas turbinas la expansión del vapor se realiza en el rotor la turbina.

³² Fuente: Elaboración propia.

3.9. TURBINAS DE GAS.

La turbina de gas es una máquina de combustión interna, con un proceso de combustión continuo. En un motor Otto o Diesel, el proceso de combustión es intermitente.

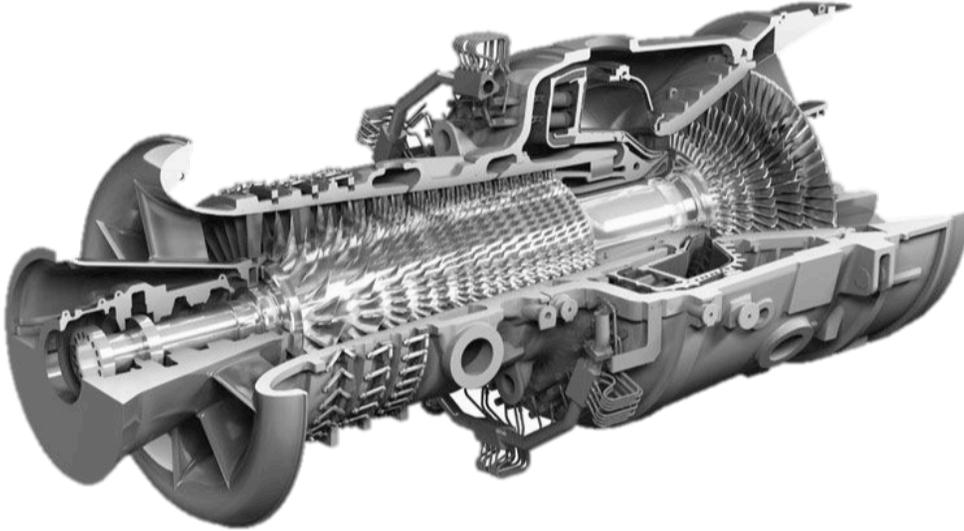


Figura 3.9.1. Turbina de gas.³³

El nombre “turbina de gas” realmente es un sistema compuesto por tres elementos principales (ver figura 3.9.2.):

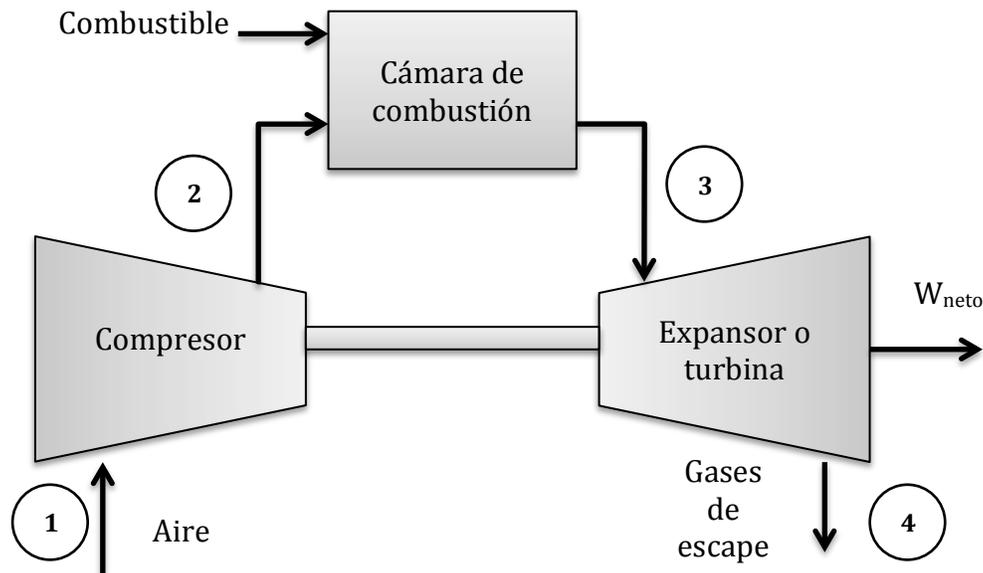


Figura 3.9.2. Esquema básico de una turbina de gas.³⁴

³³ Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/alstom-power-generation/turbinas-gas-29644-1044373.html>

³⁴ Fuente: Elaboración propia.

- Un **compresor** para gas (normalmente aire). El compresor empleado puede ser del tipo radial o del tipo axial. En este caso tiene varias etapas y puede contener secciones de baja y alta presión y puede o no tener interenfriamiento entre sus secciones.
- Un **combustor** (o cámara de combustión) para adicionar combustible y liberar su energía en la combustión. El combustor consiste principalmente de tres partes básicas: el contenedor que debe resistir la presión, el sistema de inyección de combustible y un sistema de distribución de flama que es en donde ocurre la combustión.
- Y un **expansor** que es la turbina propiamente dicha, para convertir la energía térmica en trabajo. El expansor es de flujo axial y requiere 2 a 4 etapas normalmente, aunque puede tener también secciones de alta, media y baja presión.

Las turbinas de gas operan en la configuración de “ciclo simple” muy cercana al Brayton.

El ciclo Braiton teórico cerrado, consiste de cuatro procesos, dos isoentrópicos (compresión y expansión) y dos isobáricos (Combustión y escape).

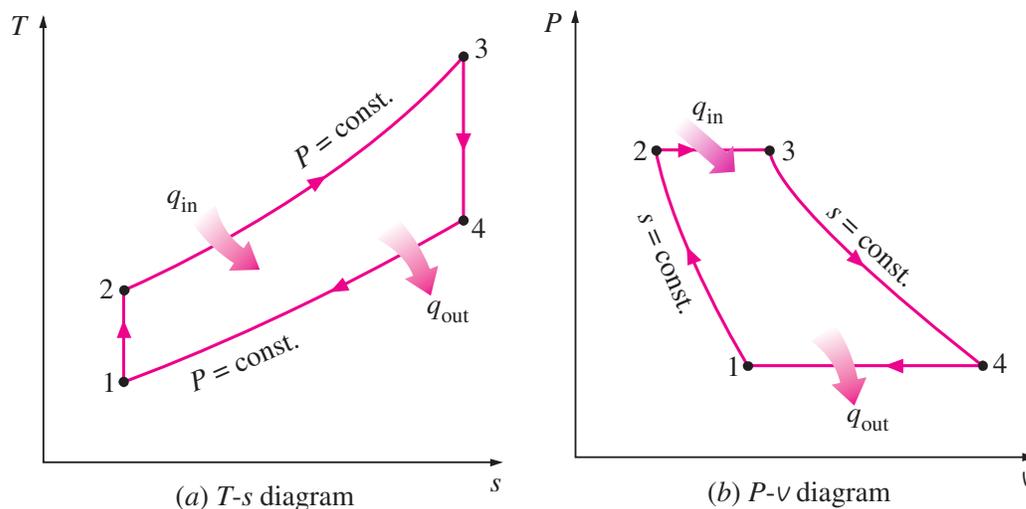


Figura 3.9.3. Diagramas T-s (a) y P-v (b) del ciclo Brayton ideal.³⁵

El trabajo producido por la turbina es:

$$W_t = C_p(T_3 - T_4) \quad \dots \quad \text{Ec.18}$$

³⁵ Fuente: Thermodynamics 5th Edition, An Engineering Approach. Yunus A. Çengel, Michael A. Boles.

Parte de ese trabajo es tomado por el compresor:

$$W_c = C_p(T_2 - T_1) \quad \dots \quad \text{Ec.19}$$

Por lo que el trabajo neto es:

$$W_{neto} = W_t - W_c \quad \dots \quad \text{Ec.20}$$

El calor suministrado al ciclo es:

$$Q_a = C_p(T_3 - T_2) \quad \dots \quad \text{Ec.21}$$

La eficiencia del ciclo esta dada por:

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{neto}}{Q_a} \quad \dots \quad \text{Ec.22}$$

$$\eta_{ciclo} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \quad \dots \quad \text{Ec.22}$$

3.9.1. Ciclos reales con turbina de gas.

Los ciclos reales en los que operan las turbinas de gas son:

- **Ciclo abierto.** En donde la descarga de la turbina es directamente a la atmósfera. Se emplea en la mayoría de las aplicaciones para la generación de energía eléctrica.

El análisis termodinámico del ciclo abierto es igual al indicado en el ciclo Brayton teórico, con excepción que la descarga no regresa al sistema, y que los procesos de la turbina y el compresor no son reversibles, por lo que hay que considerar sus eficiencias.

- **Ciclo regenerativo.** El fluido de trabajo es descargado por la turbina a un intercambiador de calor (regenerador) para precalentar el aire de admisión para reducir el consumo de combustible en el ciclo.

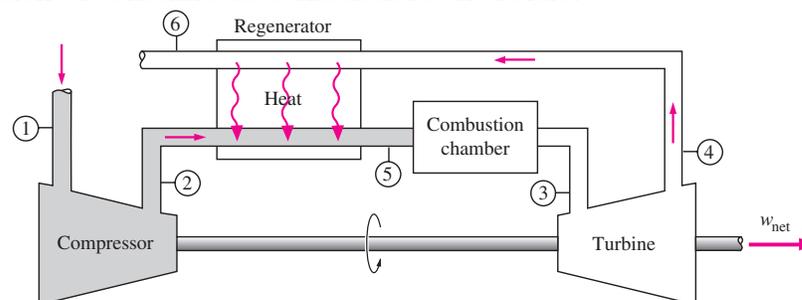


Figura 3.9.4. Turbina de gas con regenerador.³⁶

³⁶ Fuente: Thermodynamics 5th Edition. Yunus A. Çengel & Michael A. Boles.

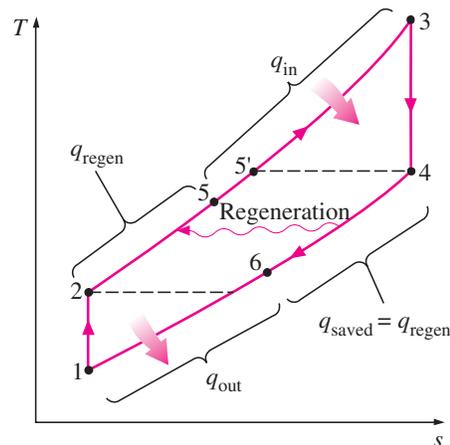


Figura 3.9.5. Diagrama T-s del ciclo Brayton con regeneración.³⁷

- **Cheng.** En el Ciclo Cheng los gases de escape se utilizan en una caldera de recuperación para producir vapor. Parte del vapor o agua tratada se puede inyectar a la cámara de combustión de la turbina para incrementar la masa. Este incremento de masa, produce un mayor trabajo.

Este ciclo puede ser conveniente cuando existan variaciones importantes de demanda eléctrica o vapor.

Este sistema puede absorber variaciones en las demandas de calor y electricidad y se controla mediante la inyección de vapor o el uso de quemadores auxiliares.

- **Humidificación en cascada “chat”.** Consiste en 2 turbogrupos, uno de ellos con un tren de compresión y un expansor y el otro similar a las configuraciones tradicionales.

3.9.2. Tipos de turbinas de gas:

Turbinas industriales (tipo pesado o “frame”). Son diseñadas para aplicaciones específicas en instalaciones fijas.

Turbinas Aero-derivadas. Son turbinas de tecnología usadas en la mayoría de los aviones adaptada para sistemas de generación eléctrica. Son usadas para plantas generadoras tanto de base como para picos y se emplean en barcos y para propulsar compresores en gasoductos.

³⁷ Fuente: Thermodynamics 5th Edition, An Engineering Approach. Yunus A. Çengel, Michael A. Boles.

4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ACV USANDO SIMAPRO.

4.1. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y EL ALCANCE.

4.1.1. Motivo.

Conocer las emisiones producidas en una planta termoeléctrica convencional (350 MW) y una de ciclo combinado (753 MW) en la producción de energía eléctrica.

4.1.2. Objetivo.

Hacer un análisis de ciclo de vida para una planta termoeléctrica convencional y una planta de ciclo combinado y comparar sus impactos ambientales aplicando la herramienta SimaPro.

4.1.3. Alcance y límites del sistema.

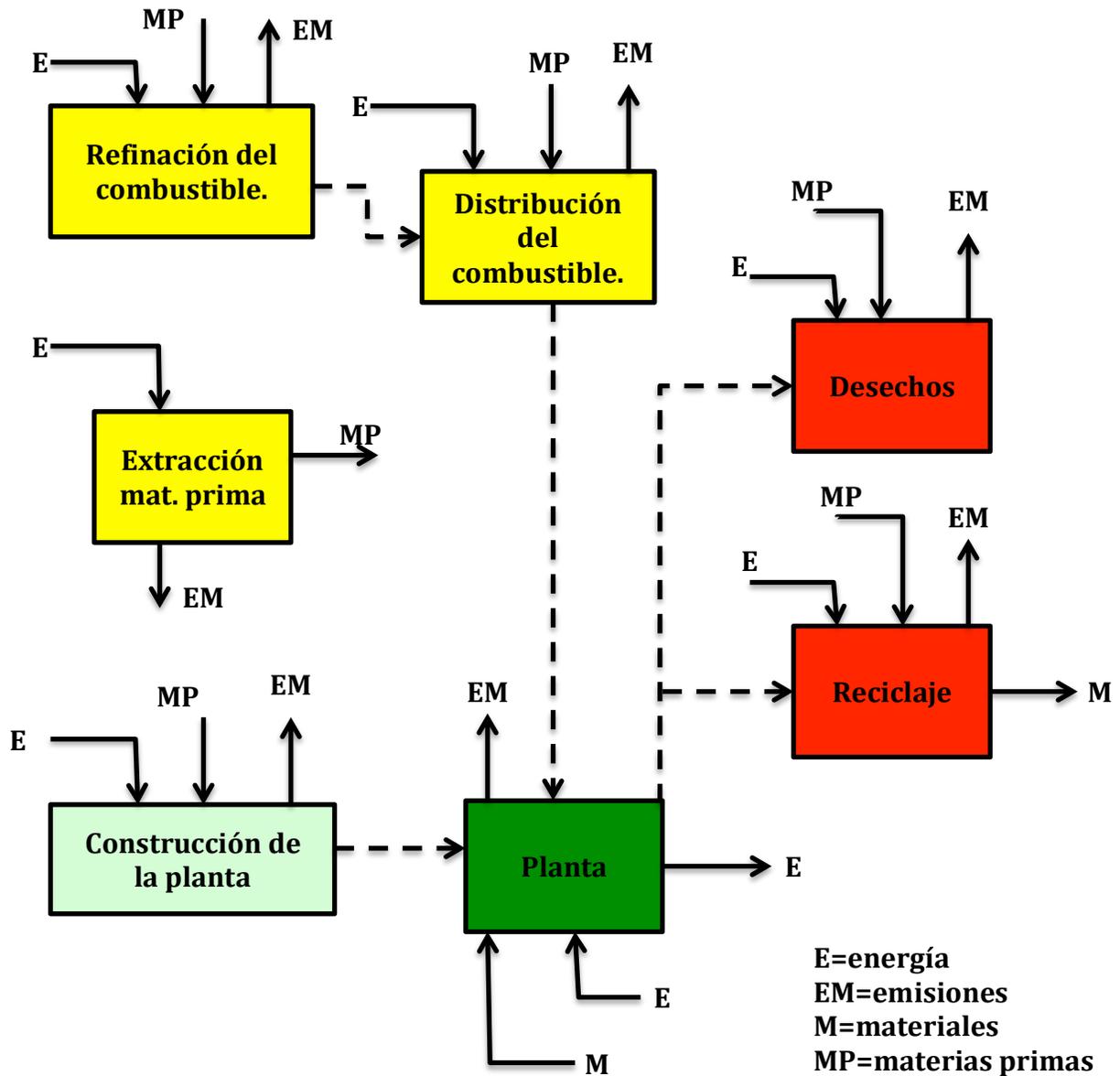
Obtener las emisiones producidas en la producción de energía eléctrica sin considerar las pérdidas generadas durante la transmisión; sólo las pérdidas en la planta por usos propios ya que la energía tomada para el análisis es la producida directamente por los generadores (energía neta producida en planta). Se analizan los efectos producidos durante la fabricación de la planta por uso de materiales como concreto, acero, hierro y aluminio. Sin embargo, no se contemplan escenarios de residuos para estos materiales en su desmantelamiento después de su vida útil. Los efectos producidos por extracción, refinación y transporte de los combustibles se obtienen con ayuda de la base de datos de SimaPro (ecoinvent). Para los cálculos de emisiones por la quema de los combustibles se utilizan los análisis físico-químicos de un gas natural y un combustóleo producidos en México. Se consideran condiciones ISO: Temperatura ambiente a 15°C, humedad relativa de 60% y presión atmosférica al nivel del mar.

Las figuras 4.1.3.1. y 4.1.3.2. muestran gráficamente los límites del sistema, las líneas continuas representan los flujos reales de materia y energía de cada proceso. Las líneas punteadas indican las conexiones entre los diferentes procesos, los bloques de procesos en color amarillo se obtienen con ayuda de la base de datos de SimaPro, el proceso de construcción de la planta (bloque verde claro) se obtiene a partir de datos de plantas ya construidas. En este estudio se da mayor importancia a lo que ocurre dentro de la planta (bloque verde oscuro), los procesos de desechos y reciclaje (bloques rojos) no se calculan debido a la falta de información de éstos.

4.1.4. Unidad funcional.

Se seleccionó como unidad funcional un kWh.

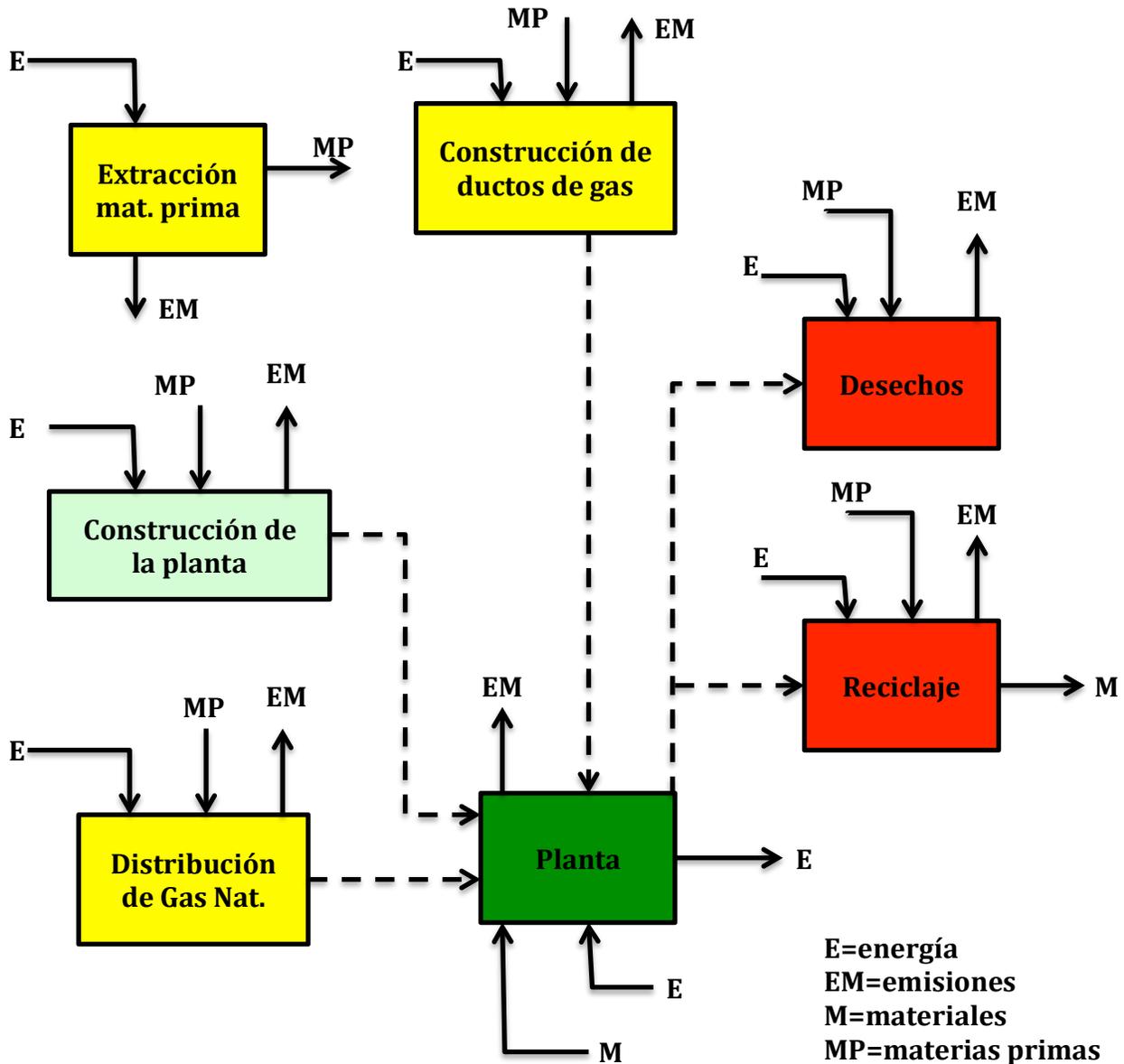
Figura 4.1.3.1³⁸. Límites del sistema para la producción de energía en una planta termoeléctrica convencional.



En esta figura se pueden observar, en cada uno de los procesos, las entradas de energía, materiales y sus correspondientes salidas de emisiones y materiales.

³⁸ Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.1.3.2³⁹. Límites del sistema para la producción de energía en una planta de Ciclo combinado de gas.

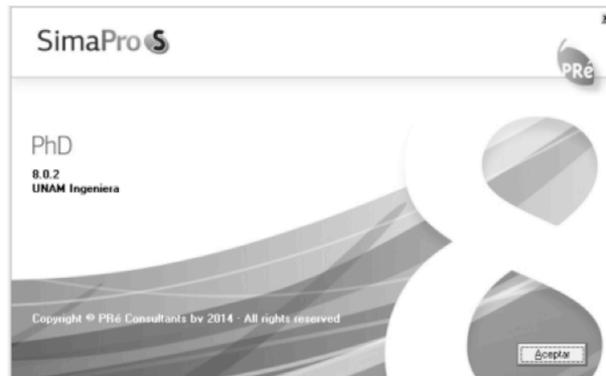


En esta figura se pueden observar, en cada uno de los procesos, las entradas de energía, materiales y sus correspondientes salidas de emisiones y materiales.

³⁹ Fuente: Elaboración propia.

4.1.5 Definición del objetivo y el alcance en SimaPro.

Este análisis se realizó con ayuda de SimaPro 8.0.2.



Lo primero que se hizo, como la metodología lo indica, fue definir el objetivo y el alcance en SimaPro⁴⁰ llenando el apartado de “objetivo y alcance” quedando de la siguiente manera:

Instructor	Nombre
Instructores	ACV planta termoelectrica y CC - RRC
Objetivo y alcance	Fecha
Descripción	12/05/2014
Bibliotecas	Autor
Inventario	Roberto Ramirez Cruz
Procesos	Comentario
Fases del producto	Datos finales
Descripciones del sistema	Tipo ACV
Tipos de residuo	Unspecified
Parámetros	Objetivo
Evaluación de impacto	Hacer un análisis de ciclo de vida para una planta termoelectrica convencional y una planta de ciclo combinado y comparar sus impactos ambientales aplicando la herramienta SimaPro.
Métodos	Motivo
Configuraciones de cálculo	Conocer las emisiones producidas en una planta termoelectrica convencional (350 MW) y una de ciclo combinado (753 MW).
Interpretación	Quien ordena el proyecto
Interpretación hace a otro documento	FI-UNAM
Datos generales	Parte interesada
Referencia Bibliográfica	Sistemas energéticos
Sustancias	Ejecutor del Proyecto
Unidades	Roberto Ramirez Cruz
Cantidades	Unidad funcional
Imágenes	1 kWh neto generado.
	Flujos de referencia
	1 KWh neto generado.
	Escenarios alternativos
	no aplica

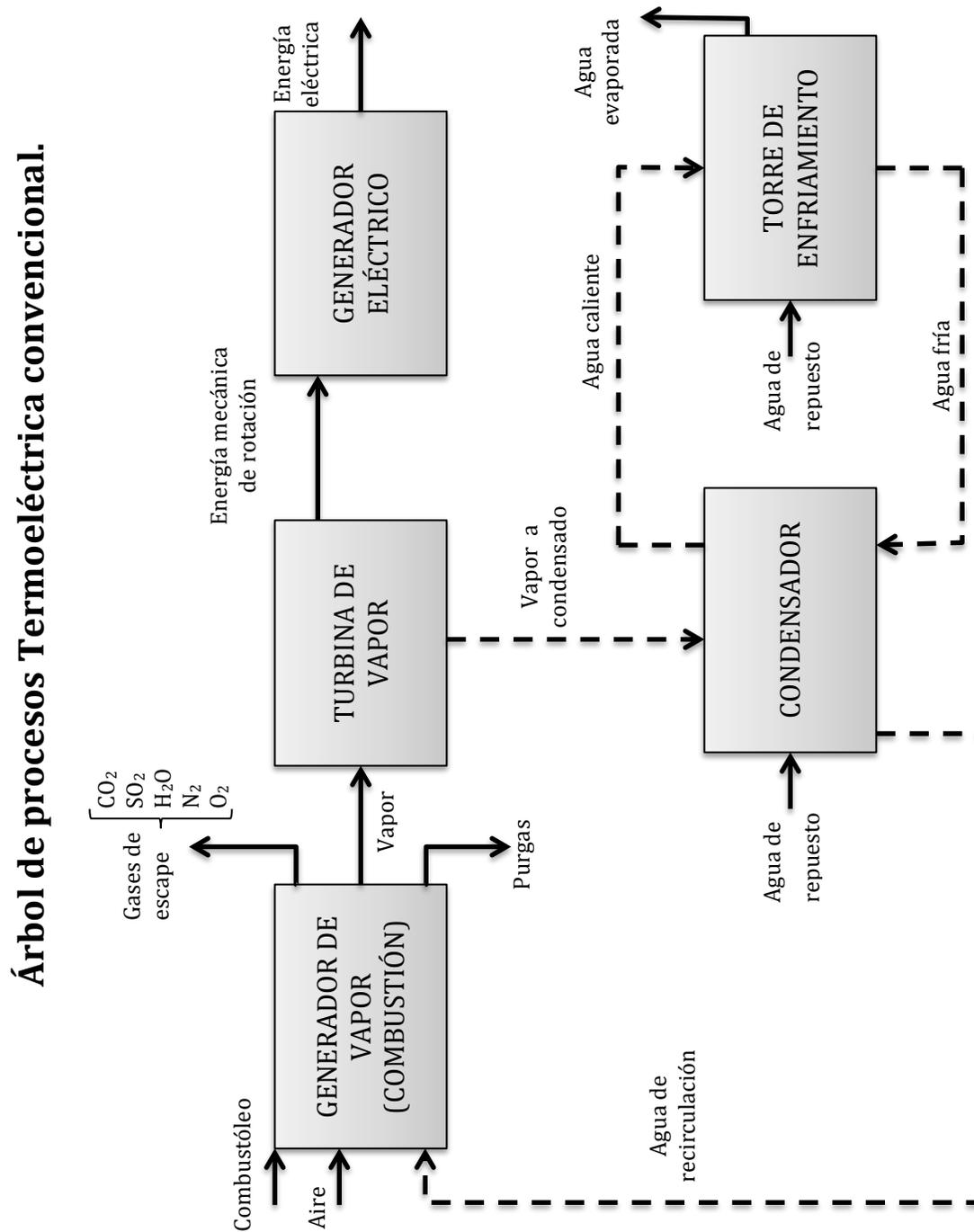
⁴⁰ Nota: Para mayor detalle sobre el manejo del software consultar el “Tutorial de utilización SimaPro” elaborado por el autor en:

<https://mega.co.nz/#!HMkjinKBI!sXqKtvEqPGqFb2t-u8QzinhMjxys7cRuHjjhMQgm2G4>

4.2. ANÁLISIS DEL INVENTARIO.

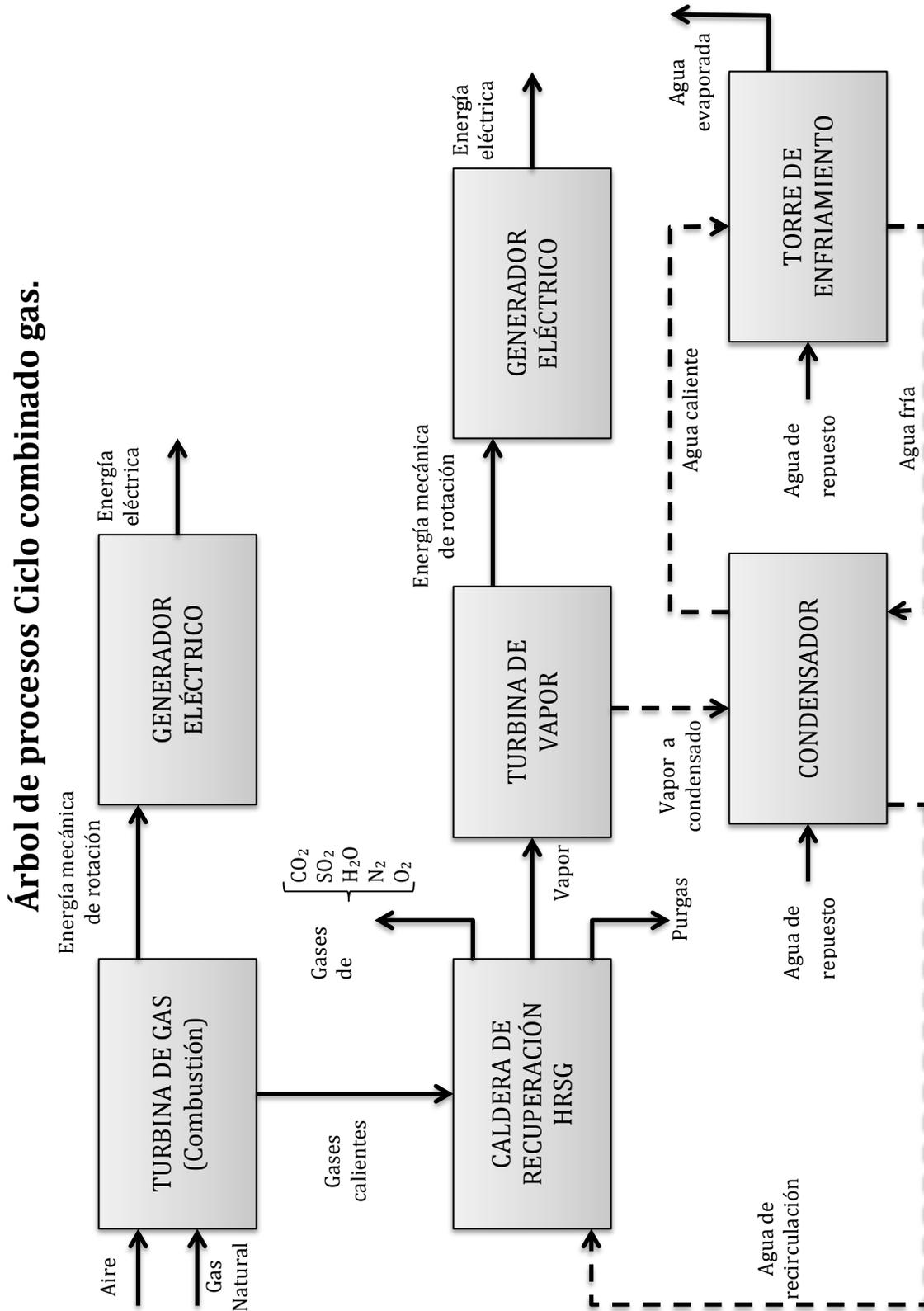
Para tener un panorama amplio de lo que ocurre dentro de la planta primero se realizaron los árboles de procesos.

Figura 4.2.1. Árbol de procesos Termoeléctrica convencional⁴¹.



⁴¹ Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2.2. Árbol de procesos Ciclo combinado gas⁴².



⁴² Fuente: Elaboración propia.

Con el panorama amplio de los árboles de procesos se procedió entonces a realizar los ecobalances para cada proceso individualmente.

4.2.1. Planta Termoeléctrica convencional.

Los parámetros de diseño de la planta son los siguientes:

Tabla 4.2.1. Parámetros de diseño planta termoeléctrica convencional⁴³.

Parámetros de diseño	Datos
Tamaño de la planta	350.00 [MW]
Capacidad neta de la planta	337.30 [MW]
Potencia neta de la turbina de vapor	337.30 [MW]
Usos Propios	4.00 [%]
Vida útil	30 [años]
Presión atmosférica	101,325.00 [Pa]
Temperatura ambiente	15.00 [°C]
Humedad relativa	60.00 [%]

Los sistemas evaluados en este estudio fueron: la construcción de la planta (figura 4.2.1.1.), el generador de vapor (figura 4.2.1.2.), la turbina de vapor (figura 4.2.1.3.) y el generador eléctrico (figura 4.2.1.4.). De estos sistemas se realizaron sus respectivos ecobalances mediante varios cálculos y uso de tablas que se encuentran detallados en el anexo A.

Figura 4.2.1.1. Ecobalance para la construcción de la planta⁴⁴.



⁴³ Fuente: Elaboración propia con datos de planta tipo del COPAR.

⁴⁴ Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2.1.1. Resultados del cálculo del ecobalance para la construcción de la planta referidas a la unidad funcional⁴⁵.

Insumos y residuos	Cantidad
Concreto	1.02547E-07[m ³ /kWh]
Acero	1.95166E-07[ton/kWh]

En la figura 4.2.1.1. se muestran solo algunas entradas necesarias para la construcción de la planta, pero es importante señalar que se requieren de otros insumos como energía eléctrica, combustibles, agua, etc.. Los resultados obtenidos en la tabla 4.2.1.1. no muestran las cantidades de hierro y aluminio ya que no se tienen datos de éstos.

Figura 4.2.1.2. Ecobalance para la operación del generador de vapor⁴⁶.

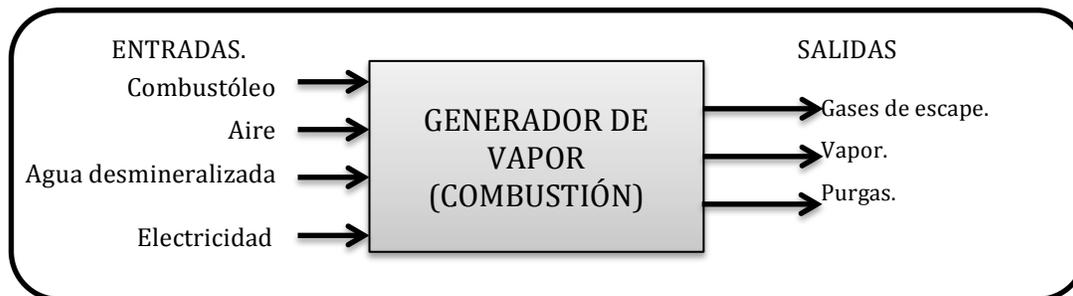


Tabla 4.2.1.2. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación del generador de vapor referidas a la unidad funcional⁴⁷.

Insumos y residuos	Cantidad
Combustóleo	0.2400[kg/kWh]
Aire	4.2761[kg/kWh]
Agua desmineralizada	0.0786[kg/kWh]
Gases de escape:	4.5161[kg/kWh]
CO ₂	0.7461[kg/kWh]
SO ₂	0.0163[kg/kWh]
H ₂ O	0.2624[kg/kWh]
N ₂	3.2658[kg/kWh]
O ₂	0.2249[kg/kWh]
Purgas	0.0786[kg/kWh]
Vapor	3.0001[kg/kWh]

⁴⁵ Fuente: Elaboración propia con datos del libro "Criterios de diseños de plantas termoeléctricas".

⁴⁶ Fuente: Elaboración propia.

⁴⁷ Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.2.1.2. no se muestra la cantidad de electricidad usada por los equipos auxiliares, como la bomba de combustible y el ventilador de tiro forzado, para la operación del generador de vapor debido a que no se tienen los datos específicos de éstos y se consideraran al final como parte de los usos propios.

Figura 4.2.1.3. Ecobalance para la operación de la turbina de vapor⁴⁸.



Tabla 4.2.1.3. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación de la turbina de vapor referidas a la unidad funcional⁴⁹.

Insumos y residuos	Cantidad
Vapor	3.0001 [kg/kWh]
Energía mecánica	1.0643 [kW _m /kWh]
Vapor a condensado	3.0001 [kg/kWh]

En la tabla 4.2.1.3. no se muestra la cantidad de aceite requerido para la operación de la turbina de vapor ni la electricidad ya que no se cuenta con dicha información.

Figura 4.2.1.4. Ecobalance para la operación del generador eléctrico⁵⁰.



⁴⁸ Fuente: Elaboración propia.

⁴⁹ Fuente: Elaboración propia.

⁵⁰ Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2.1.4. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación del generador eléctrico referidas a la unidad funcional⁵¹.

Insumos y residuos	Cantidad
Energía mecánica	1.0643[kWh _m /kWh]
Energía eléctrica Bruta	1.0377[kWh _{eb} /kWh]
Usos propios	0.0377[kWh/kWh]
Energía eléctrica neta	1.0000[kWh _n /kWh]

En la tabla 4.2.1.4. no se muestra la cantidad de aceite ni refrigerante ya que no se cuenta con dicha información.

4.2.2. Planta de ciclo combinado.

Los parámetros de diseño de la planta son los siguientes:

Tabla 4.2.2. Parámetros de diseño planta ciclo combinado⁵².

Parámetros de diseño	Datos
Tamaño de la planta	753.82 [MW]
Capacidad neta de la planta	738.28 [MW]
Potencia neta de las turbinas de gas	510.98 [MW]
Potencia neta de la turbina de vapor	227.30 [MW]
Vida útil	30 [años]
Usos Propios	2.10 [%]
Presión atmosférica	101,325.00 [Pa]
Temperatura ambiente	15.00 [°C]
Humedad relativa	60.00 [%]

Los sistemas evaluados en este estudio fueron: la construcción de la planta (figura 4.2.2.1.), la turbina de gas (figura 4.2.2.2.), la caldera de recuperación (figura 4.2.2.3), la turbina de vapor (figura 4.2.2.4) y el generador eléctrico (figura 4.2.2.5.). De estos sistemas se realizaron sus respectivos ecobalances mediante varios cálculos y uso de tablas que se encuentran detallados en el anexo B.

⁵¹ Fuente: Elaboración propia.

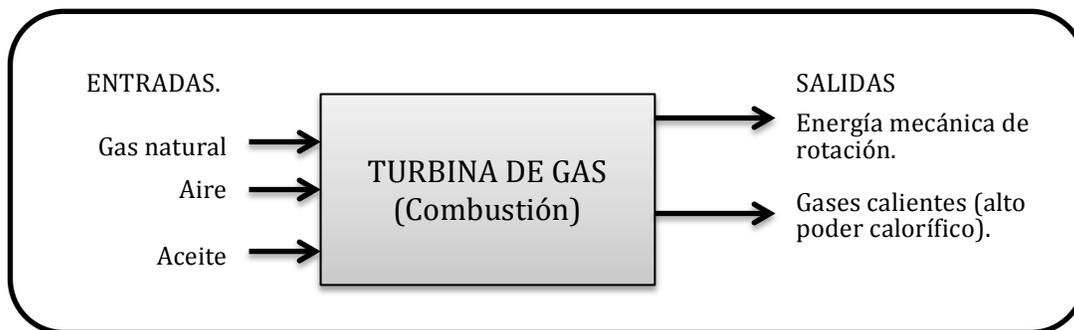
⁵² Fuente: Elaboración propia con datos de planta tipo del COPAR.

Figura 4.2.2.1. Ecobalance para la construcción de la planta⁵³.

En la figura 4.2.2.1. se muestran solo algunas entradas necesarias para la construcción de la planta, pero es importante señalar que se requieren de otros insumos como energía eléctrica, combustibles, agua, etc.; además, se emiten diversos residuos productos de la utilización de materiales que tuvieron diversos procesos previos como la creación del concreto fabricación del acero , etc.. Sólo se logró recabar la información de la tabla 4.2.2.1.

Tabla 4.2.2.1. Resultados del cálculo del ecobalance para la construcción de la planta referidas a la unidad funcional⁵⁴.

Insumos y residuos	Cantidad
Concreto	1.0601E-07[m ³ /kWh]
Acero	8.07656E-05[kg/kWh]
Hierro	1.06195E-06 [kg/kWh]
Aluminio	5.30976E-07[kg/kWh]

Figura 4.2.2.2. Ecobalance para la operación de la turbina de gas⁵⁵.

⁵³ Fuente: Elaboración propia.

⁵⁴ Fuente: Elaboración propia con datos del estudio "Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined-Cycle Power Generation System".

⁵⁵ Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2.2.2. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación de la turbina de gas referidas a la unidad funcional⁵⁶.

Insumos y residuos	Cantidad
Gas Natural	0.1936[m ³ /kWh]
Aire	2.5758[kg/kWh]
Gases de Calientes:	2.6940[kg/kWh]

En la tabla 4.2.2.2. no se muestra la cantidad de aceite requerido ni otros insumos necesarios para la operación de la turbina de gas debido a la falta de información de estos, sólo se logró recabar y calcular el gas natural, el aire y la cantidad de gases calientes.

Figura 4.2.2.3. Ecobalance para la operación de la caldera de recuperación⁵⁷.



Tabla 4.2.2.3. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación de la caldera de recuperación referidas a la unidad funcional⁵⁸.

Insumos y residuos	Cantidad
Agua desmineralizada	0.0090[kg/kWh]
Gases calientes	2.6940[kg/kWh]
Purgas	0.0090[kg/kWh]
Gases de escape:	2.6940[kg/kWh]
CO ₂	0.3300[kg/kWh]
SO ₂	0.0000[kg/kWh]
H ₂ O	0.2670[kg/kWh]
N ₂	1.9673[kg/kWh]
O ₂	0.1296[kg/kWh]

⁵⁶ Fuente: Elaboración propia.

⁵⁷ Fuente: Elaboración propia.

⁵⁸ Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4.2.2.3. muestra las principales entradas y salidas del ecobalance para la operación de la caldera de recuperación, faltaría mencionar algunos otros que no se tomaron en cuenta debido la falta de información como de electricidad requerida para los equipos auxiliares, aditivos para el tratamiento y eliminación de impurezas del agua, entre otros. Para el análisis de la caldera de recuperación no se consideró postcombustión, las emisiones de gases de escape son las provenientes de la combustión de gas en la turbina.

Figura 4.2.2.4. Ecobalance para la operación de la turbina de vapor⁵⁹.



Tabla 4.2.2.4. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación de la turbina de vapor referidas a la unidad funcional⁶⁰.

Insumos y residuos	Cantidad
Energía mecánica	1.0471794[kWeb/kWh]

En la tabla 4.2.2.4 se muestra sólo la energía mecánica ya que fue el único insumo que se calculó debido a que para este ciclo la mayoría de los cálculos fueron obtenidos mediante datos referidos del COPAR, además no se logró conocer cuáles son los consumos independientes de electricidad, todos los autoconsumos se consideraron dentro de los usos propios.

Figura 4.2.2.5. Ecobalance para la operación del generador eléctrico⁶¹.



⁵⁹ Fuente: Elaboración propia.

⁶⁰ Fuente: Elaboración propia.

⁶¹ Fuente: Elaboración propia.

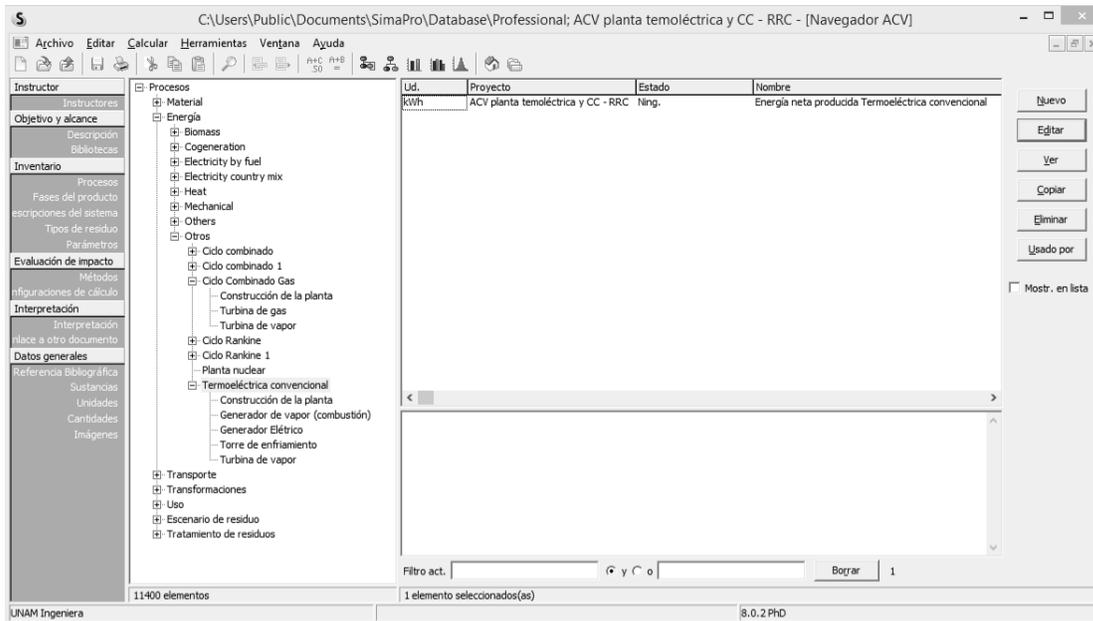
Tabla 4.2.2.5. Resultados del cálculo del ecobalance para la operación del generador eléctrico referidas a la unidad funcional⁶².

Insumos y residuos	Cantidad
Energía eléctrica Bruta	1.0210[kWeb/kWh]
Usos propios	0.0210[kW/kWh _n]
Energía eléctrica neta	1.0000[kWh _n /kWh _n]

En la tabla 4.2.2.5. no se muestra la cantidad de aceite ni refrigerante ya que no se cuenta con dicha información.

Una vez realizados los inventarios de todos los procesos, estos se introdujeron a SimaPro para su evaluación.

Figura 4.2.6. Procesos introducidos en SimaPro⁶³.



⁶² Fuente: Elaboración propia.

⁶³ Fuente: Captura de pantalla Software SimaPro.

4.3. EVALUACIÓN DE IMPACTOS.

Los resultados obtenidos del análisis de ciclo de vida con ayuda de SimaPro con la metodología "ReCiPe Midpoint (I) V1.06 / World ReCiPe I⁶⁴" para 1 kWh fueron los siguientes:

Tabla 4.3. Cantidad de impactos producidos por categoría para las entradas analizadas⁶⁵.

Categoría de impacto	Unidad	Ciclo Combinado	Termoeléctrica convencional
Cambio climático	kg CO ₂ eq	0.4519	0.8692
Disminución de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	5.943E-08	1.081E-07
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	1.217E-03	7.463E-03
Niebla fotoquímica	kg NMVOC	3.001E-04	2.103E-03
Formación de material particulado	kg PM10 eq	7.177E-05	3.581E-03
Radiación ionizante	kg U ₂₃₅ eq	6.450E-04	1.041E-02
Acidificación de suelos	kg SO ₂ eq	2.295E-04	1.744E-02
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	1.909E-06	2.063E-05
Eutrofización marina	kg N eq	6.261E-06	2.396E-05
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	7.658E-06	6.379E-05
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	4.521E-05	6.901E-04
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	9.182E-05	5.886E-04
Ocupación de tierras agrícolas	m ² a	7.399E-05	3.578E-04
Ocupación de suelos urbanos	m ² a	1.471E-04	1.120E-03
Transformación de suelos por ocupación	m ²	9.419E-05	4.294E-04
Agotamiento del agua	m ³	7.494E-05	1.099E-03
Agotamiento de minerales	kg Fe eq	1.259E-03	2.856E-03
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil eq	0.1975	0.2987

A continuación se describen brevemente los impactos ambientales mostrados en esta tabla y sus unidades de medida.

Cambio climático.

El Cambio Climático es un cambio significativo y duradero de los patrones locales o globales del clima, las causas pueden ser naturales, como por ejemplo, variaciones en la energía que se recibe del Sol, erupciones volcánicas, circulación oceánica,

⁶⁴ Nota: Para detalles de la metodología se puede consultar el manual de métodos incluido en el apartado de ayuda de SimaPro.

⁶⁵ Fuente: Elaboración propia con datos de cálculo producidos por SimaPro.

procesos biológicos y otros, o puede ser causada por influencia antrópica (por las actividades humanas), como por ejemplo, a través de la emisión de CO₂ y otros gases que atrapan calor, o alteración del uso de grandes extensiones de suelos que causan, finalmente, un calentamiento global.

Se mide en kilogramos de bióxido de carbono equivalentes.

Disminución de la capa de ozono.

“La capa de ozono en la estratósfera protege la vida en la tierra de los rayos ultravioleta de la luz solar. En los años 80, la comunidad científica comenzó a acumular evidencia de que la capa de ozono estaba reduciéndose. La reducción de la capa de ozono aumenta el nivel de radiación ultravioleta que llega a la superficie de la tierra, lo cual, a su vez, puede aumentar las probabilidades de exposición excesiva a los rayos ultravioleta y los problemas de salud asociados con ello, como cáncer, cataratas e inhibición del sistema inmunitario”⁶⁶.

La disminución de la capa de ozono se mide en kilogramos de clorofluorocarbonos (CFC) equivalentes. Los clorofluorocarbonos son derivados de los hidrocarburos saturados obtenidos mediante la sustitución de átomos de hidrógeno por átomos de flúor y/o cloro principalmente.

Toxicidad humana.

Toxicidad: Es la capacidad de cualquier sustancia química de producir efectos perjudiciales sobre un ser vivo, al entrar en contacto con él.

La toxicidad humana es el nivel de peligrosidad que presenta un producto o sustancia para la vida humana.

La toxicidad se mide en kilogramos de 1,4-DB (diclorobenceno). El 1,4 DB es un sólido incoloro blanco, se usa comúnmente para fabricar bloques desodorantes para los botes de basura y en baños, y para ayudar a controlar el olor en sitios donde se mantienen animales.

El diclorobenceno (C₆H₄Cl₂) tiene efectos nocivos para la salud como son aturdimiento, dolor de cabeza y problemas al hígado.

⁶⁶ Fuente: <http://www.epa.gov/sunwise/es/capaozono.html>

Niebla fotoquímica (smog fotoquímico).

La niebla de verano es aquella provocada por altas concentraciones de óxidos de nitrógeno y compuestos Orgánicos Volátiles (COV) acompañados de una fuerte radiación solar que generan altas concentraciones de ozono superficial.

La niebla fotoquímica se mide en kilogramos de NMVOC (Non-methane volatile organic compounds) compuestos orgánicos volátiles distintos del metano equivalentes, Los NMVOC son un conjunto de compuestos orgánicos que difieren ampliamente en su composición química.

Formación de material particulado.

El Material Particulado (PM, Particulate matter) es una compleja mezcla de partículas suspendidas en el aire que varían en tamaño y composición dependiendo de sus fuentes de emisiones.

Las partículas están generalmente compuestas de hidrocarburos, sulfuro y cenizas metálicas.

Las partículas se distribuyen de tres modos distintos: ultrafino (< 0.1 micras), fino (entre 0.1 y 1 micras), y grueso (>1 micras). La Agencia de Protección del Medioambiente de Estados Unidos y otras agencias alrededor del mundo regulan el nivel de partículas en el ambiente de un diámetro inferior a 10 micras (PM10). Algunas agencias, incluyendo la EPA de Estados Unidos , también regulan las partículas inferiores a 2.5 micrones de diámetro (MP2.5).

Estudios actuales reportan el aumento en la morbilidad⁶⁷ y mortalidad, particularmente entre aquellas personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares debido a exposición a corto plazo de las PM10 y PM2.5.

Radiación ionizante.

La radiación ionizante es un tipo de energía liberada por los átomos en forma de ondas electromagnéticas (rayos gamma o rayos X) o partículas (partículas alfa y beta o neutrones).

Las personas están expuestas a la radiación natural que proviene de muchas fuentes, como los más de 60 materiales radiactivos naturales presentes en el suelo, el agua y el aire; además de radiación por fuentes cósmicas.

⁶⁷ Morbilidad: Es la cantidad de individuos que son considerados enfermos o que son víctimas de enfermedad en un espacio y tiempo determinado

La exposición humana a la radiación proviene también de fuentes artificiales que van desde la generación de energía nuclear hasta el uso médico de la radiación para fines diagnósticos o terapéuticos.

Los efectos de la radiación en los seres vivos son dañinos para su integridad física. Pueden ser inmediatos o tardíos, según la dosis. Cuando el organismo humano recibe de golpe altas dosis de radiación, puede sobrevenir la muerte. Cantidades altas recibidas en fracciones pequeñas y espaciadas producen efectos tardíos, como la leucemia, cánceres, cataratas y otros procesos degenerativos. Dosis bajas y espaciadas en el tiempo pueden producir efectos tardíos o anomalías en las próximas generaciones.

La radiación ionizante se mide en kilogramos de uranio 235 equivalentes.

Acidificación de suelos.

La acidificación es el proceso de introducción de sustancias ácidas en el medio ambiente provocado principalmente de la quema de combustibles fósiles. Tras reaccionar con el vapor de agua en el aire, estos óxidos se convierten en compuestos ácidos que la lluvia precipita sobre la superficie terrestre.

La acidificación del suelo es el proceso por el cual el suelo absorbe cationes de hidrógeno, reduciendo su pH.

La acidificación de suelos se mide en kilogramos de dióxido de azufre equivalentes.

Eutrofización del agua (dulce y de mar).

La eutrofización es el proceso de acumulación de nutrientes en las aguas con el consiguiente crecimiento masivo de organismos, fundamentalmente algas, y la disminución de la concentración de oxígeno.

La eutrofización del agua se produce cuando recibe aportes de fósforo y de nitrógeno demasiado elevados. Entonces las poblaciones de algas microscópicas, que utilizan estos elementos como alimento básico, sufren un crecimiento explosivo y tiñen el agua. El color es una barrera opaca que impide que la luz solar llegue hasta el fondo del agua, lo que afecta al crecimiento de las algas de ese nivel. Como las algas no reciben luz, no generan oxígeno a través de la fotosíntesis y, por tanto, el medio queda pobre en este componente que es indispensable para la vida de los animales.

La eutrofización del agua dulce se mide en kilogramos de fosforo equivalentes y la del mar se mide en kilogramos de nitrógeno equivalentes.

Ecotoxicidad (terrestre, agua dulce y marina).

La ecotoxicidad se refiere a los efectos tóxicos producidos por agentes físicos y químicos en el ambiente, resultado de diversos procesos humanos o naturales, que afectan a los seres vivos y sus ecosistemas⁶⁸ (alterando las especies y reduciendo una determinada productividad).

La ecotoxicidad terrestre produce una inhibición de la germinación y del crecimiento vegetal en suelo contaminado.

La ecotoxicidad al igual que la toxicidad se mide en kilogramos de 1,4-DB (diclorobenceno) equivalentes.

Ocupación de tierras agrícolas y de suelo urbano.

La industria no requiere sólo recursos naturales, sino también espacio. La forma en que se va ocupando el espacio tiene efectos importantes en el sistema natural e, indirectamente, en el sistema social, sobre todo cuando esa ocupación se lleva a cabo a expensas de otros recursos y, muy en especial, de los terrenos agrícolas. La ocupación del espacio agrícola por establecimientos industriales significa no sólo un determinado impacto ambiental, sino también la pérdida del recurso tierra para la producción de alimentos. Por lo tanto, reduce las capacidades de sustentación del ecosistema natural frente a una población creciente.

La ocupación de suelo urbano ejerce presión sobre los sistemas naturales circundantes. Sus impactos pueden incluir la pérdida de tierras húmedas y silvestre, zonas costeras, áreas recreativas. La ocupación de suelo urbano implica un crecimiento urbano que impacta negativamente en las cuencas hidráulicas tanto del lugar como aquellas alejadas de la ciudad que lo proveen de agua.

La ocupación de tierras agrícolas y de suelo urbano se mide en metros cuadrados.

Transformación de suelos por ocupación.

“Los proyectos que al ocupar un territorio modifican las condiciones naturales por acciones tales como desmonte, compactación del suelo y otras”⁶⁹.

La transformación de suelos por ocupación se mide en metros cuadrados.

⁶⁸ Ecosistema: Es el conjunto de las condiciones del ambiente de los organismos y de sus propias interrelaciones.

⁶⁹ Fuente:

<http://www.semarnat.gob.mx/transparencia/transparenciafocalizada/impactoambiental>

Agotamiento del agua.

El agua es un recurso renovable, ya que es parte de un ciclo natural continuo e interminable. Sin embargo, se puede contaminar por las actividades humanas y volverse no útil para muchos de sus propósitos e, incluso, volverse nociva para los seres vivos que la utilizan.

El agotamiento del agua ocurre por la contaminación de la misma que se da en todos los niveles y lugares del mundo, y está muy relacionado con la contaminación del aire y con el modo en que el hombre utiliza los recursos de la Tierra.

Existen diferentes agentes contaminantes como agentes patógenos (aquellos que ocasionan enfermedades), sustancias químicas orgánicas (petróleo, plásticos, detergentes, etc.) e inorgánicas (sales, metales tóxicos, nitratos, etc.), sustancias radioactivas, entre otros.

El agotamiento del agua se mide en metros cúbicos.

Agotamiento de los minerales y de combustibles fósiles.

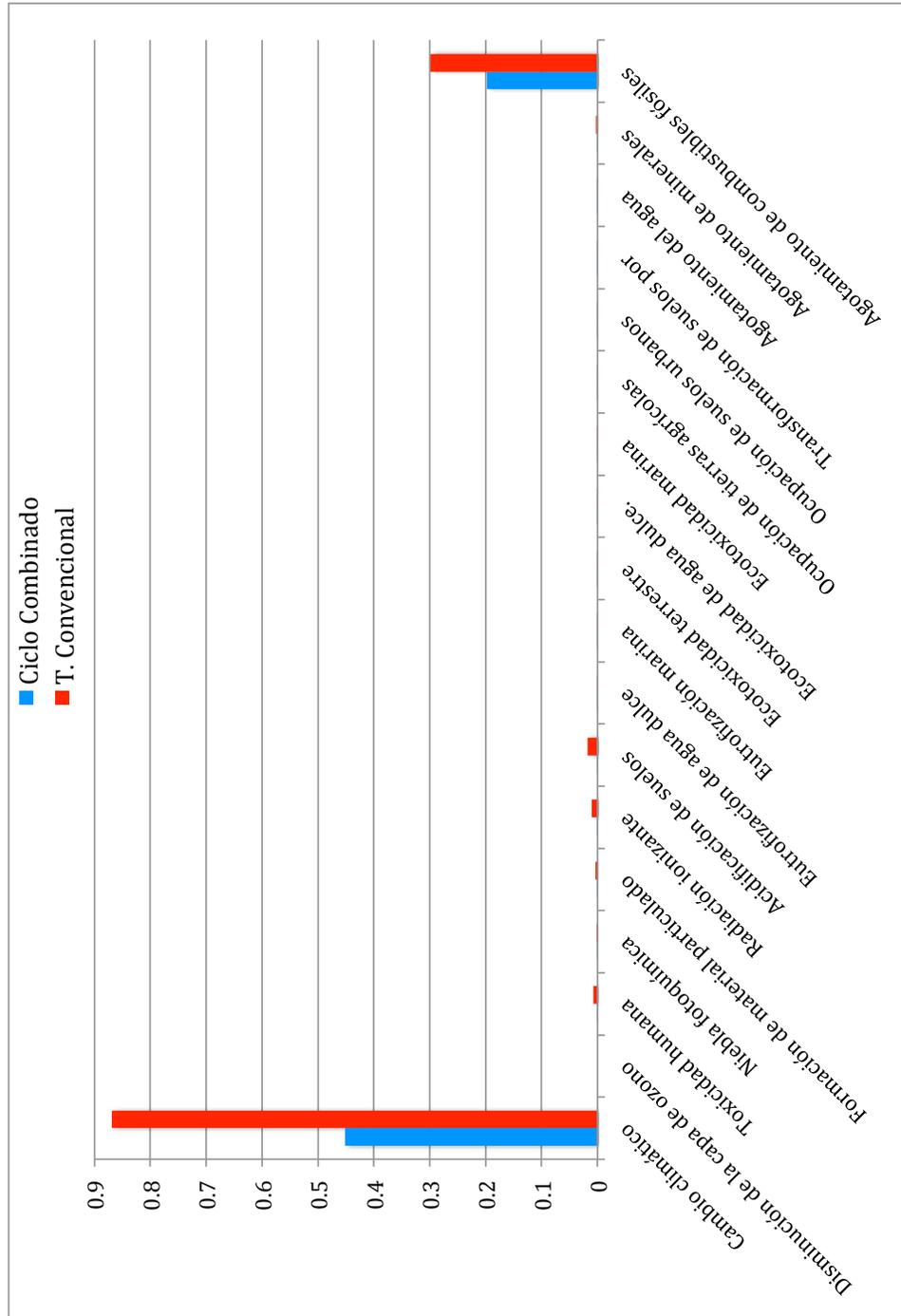
Los recursos energéticos no renovables tales como combustibles fósiles y minerales se van agotando a medida que son utilizados, disminuyendo la reserva de los mismos.

El agotamiento de los minerales se mide en kilogramos de hierro equivalentes y, el agotamiento de combustibles fósiles se mide en kilogramos de petróleo equivalentes.

4.4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

La gráfica 4.4.1. muestra los resultados obtenidos con SimaPro en donde se pueden apreciar sus efectos para los diferentes impactos.

Grafica 4.4.1. Impactos producidos en la generación de 1 kWh.⁷⁰

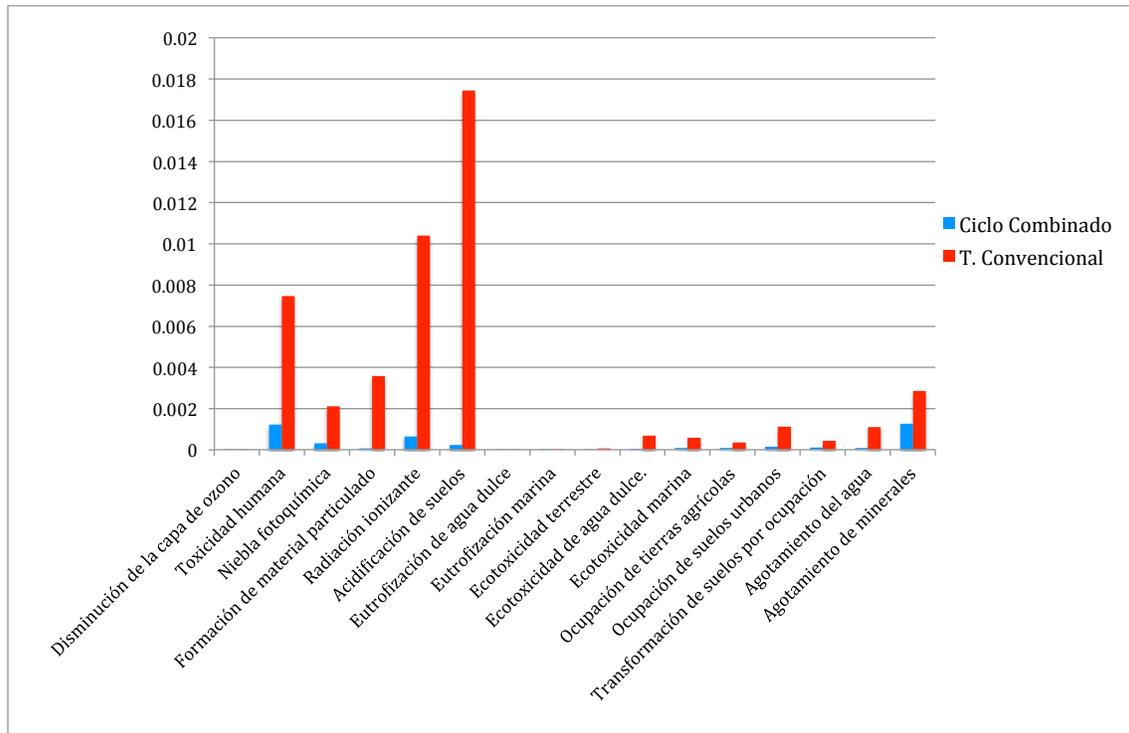


⁷⁰ Fuente: Elaboración propia con datos de la tabla 4.3.

De la gráfica 4.4.1. se puede concluir que los mayores impactos lo reciben el cambio climático y el agotamiento de combustibles fósiles, esto se debe a la quema del combustóleo y del gas natural que producen grandes emisiones de CO₂ y, que ya no pueden ser utilizados nuevamente como combustible causando su agotamiento.

Para tener un panorama mas amplio de lo que sucede con los demás impactos se creo la gráfica 4.4.2. en donde se eliminaron los impactos de cambio climático y de agotamiento de combustibles.

Gráfica 4.4.2. Impactos producidos en la generación de 1kWh.⁷¹



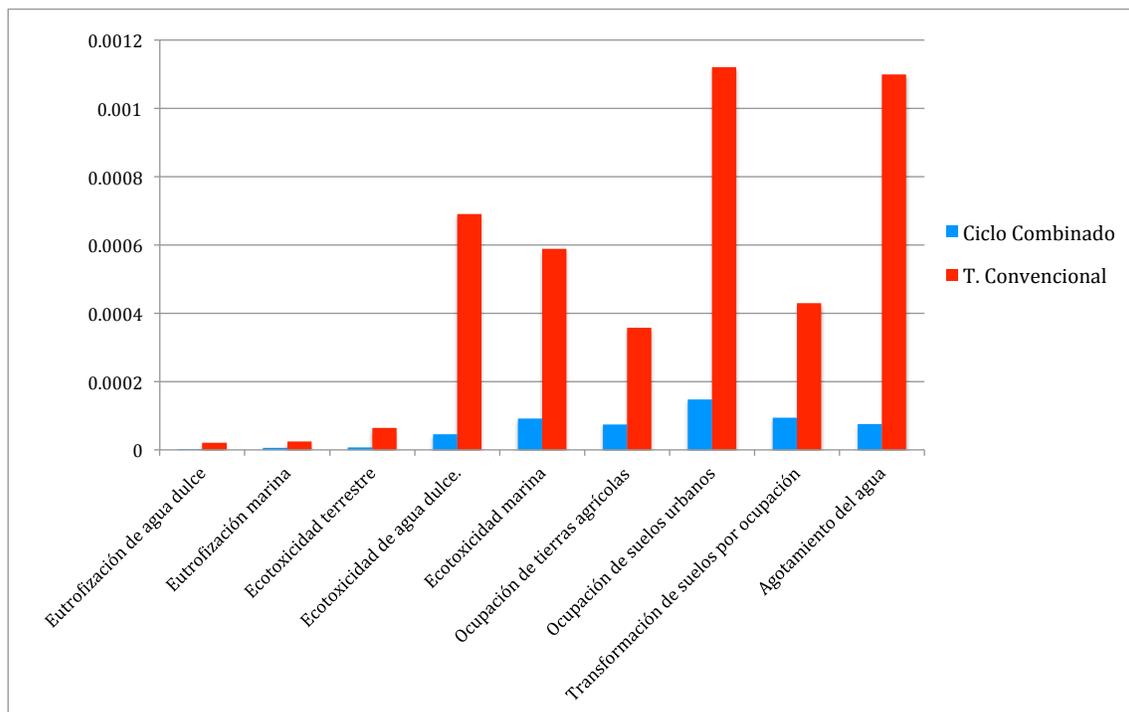
En esta gráfica se pueden apreciar con un poco mas de detalle los demás impactos en importancia como lo son la acidificación de los suelos que proviene también de la quema de combustibles debido a su contenido de azufre y, la radiación ionizante que es un impacto que en primera instancia causa desconcierto ya que dentro de la planta no se hizo uso de algún material radioactivo, mas sin embargo, revisando los ensambles del anexo C se observa que se debe a el uso de electricidad para el transporte de los combustibles y para su refinamiento, entre otros, esta energía es producida por diversas fuentes como las nucleoelectricas.

⁷¹ Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del análisis de impactos.

Para ver mas a detalle los impactos con menos emisiones se eliminaron de la gráfica 4.4.3 la toxicidad humana, niebla fotoquímica de verano, formación de material particulado, radiación ionizante y acidificación de suelos.

Entonces se generó la gráfica 4.4.3 que muestra cuáles son los impactos con menores emisiones:

Gráfica 4.4.3. Impactos producidos en la generación de 1kWh.⁷²

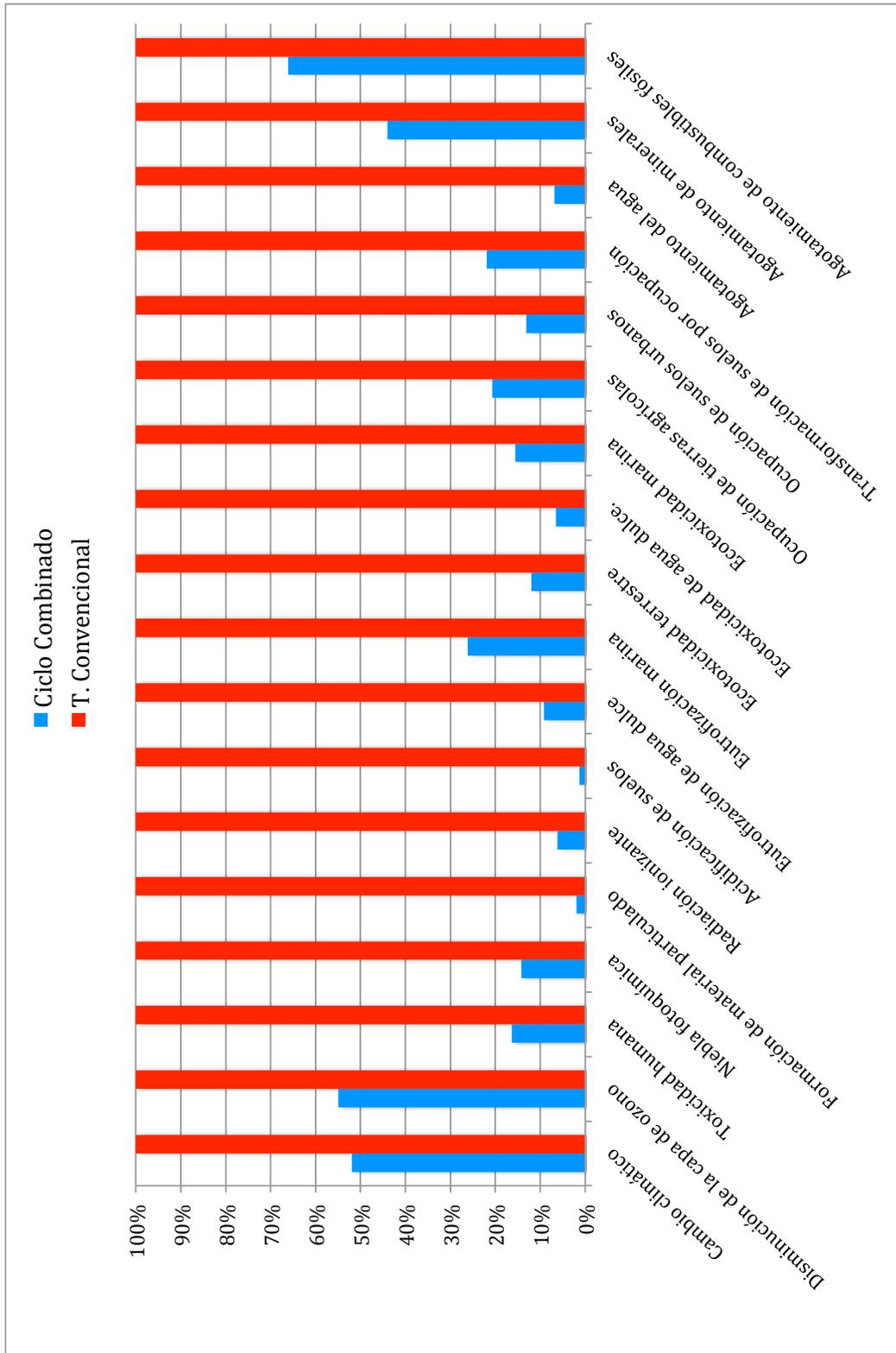


De la gráfica 4.4.3. se puede observar que el agotamiento del agua y ocupación de suelo urbano impactan en mayor cantidad que las demás, esto se debe a que en la planta el agua es una materia prima para que se lleve acabo el ciclo Rankine y para las torres de enfriamiento; la ocupación de suelo urbano se debe a la construcción de la planta.

Para cumplir con el objetivo de este estudio, que es comparar las emisiones entre las dos plantas se creó la gráfica 4.4.4., esta grafica se maneja por porcentajes, se creó dándole el 100% a aquel impacto mayor dentro de la misma categoría.

⁷² Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del análisis de impactos.

Gráfica 4.4.4. Porcentaje de impactos entre plantas.⁷³



⁷³ Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del análisis de impactos.

De la gráfica 4.4.4. se puede apreciar que la planta de ciclo combinado emite menores contaminantes que la termoeléctrica convencional en valores menores del 65% de las emisiones que produce la termoeléctrica. Esta grafica reitera que el agotamiento del agua en la planta de ciclo combinado es mucho menor que la termoeléctrica convencional debido a que se utiliza en menor cantidad en la de ciclo combinado. Se observa también que, la acidificación que produce la planta de ciclo combinado en comparación con la termoeléctrica es de apenas el 3%, esto debido a que el gas natural es un combustible mucho mas limpio que el combustóleo y que, para la obtención de la energía se utilizó en menor cantidad de gas natural debido a la mayor eficiencia del ciclo combinado.

5. CONCLUSIONES.

5. CONCLUSIONES.

Los resultados de este estudio demuestran que los mayores impactos en la generación de energía eléctrica afectan al cambio climático, esto es debido a que se queman combustibles fósiles los cuales emiten grandes cantidades de CO₂. Este estudio además permitió revisar varios de los problemas ambientales derivados en generación de electricidad.

Los resultados también confirman la necesidad de seguir apostando por la producción de electricidad preferentemente por plantas de ciclo combinado sobre las termoeléctricas convencionales; no sólo por su eficiencia termodinámica, sino también por la reducción de emisiones contaminantes derivadas de la quema de los combustibles asociados, en el primer caso gas natural y en el segundo combustóleo. Las emisiones resultan de la oxidación de los elementos químicos que componen el combustible. El gas natural es el combustible fósil más limpio que se utiliza en las plantas generadoras.

El objetivo de este estudio se cumplió, se logró hacer un análisis de ciclo de vida para una planta termoeléctrica convencional y una planta de ciclo combinado y, se compararon sus impactos ambientales con la ayuda de SimaPro.

Este estudio puede servir de referencia, tomando en cuenta los límites de los sistemas propuestos, para ver cuál es el grado de impacto en la producción de 1kWh de cada tecnología.

Al utilizar SimaPro se pudo observar que es una buena herramienta de cálculo de ACV ya que contiene una gran base de datos en donde podemos encontrar información acerca de diversos procesos de los que se desconoce o, si es necesario, podemos modificar y crear nuevos procesos que no se encuentran en la base de datos para poder trabajar posteriormente con ellos. Con la ayuda de SimaPro se pudo cuantificar de manera mucho más “fácil” los impactos asociados en la producción de electricidad, sin una herramienta como ésta; los cálculos tomarían mucho tiempo en realizarse.

BIBLIOGRAFÍA.

-
- [1] B. V. Hoof., N. Monroy, A. Saer. Producción más limpia: paradigma de gestión ambiental. Ed. Alfaomega, México, (2008).
- [2] S. C. Rizo, T. Gómez, J. L. Vivancos, R. Viñoles, P. Ferrer, R. López. Ecodiseño : ingeniería del ciclo de vida para el desarrollo de productos sostenibles. Ed. UPV, España, Valencia, (2002).
- [3] M. Aguilar, Criterios de diseño de plantas termoeléctricas. Ed. Limusa, México, (1981).
- [4] E. Santoyo-Castelazo, H. Gujba, A. Azapagic, Life cycle assessment of electricity generation in México.
- [5] CFE, Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de investigación en el sector eléctrico, Subdirección de Programación Coordinación de evaluación, México, (2011).
- [6] Miguel Capó Martí. Principios de ecotoxicología: diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente, Ed. McGraw-Hill, España, Madrid, (2002).
- [7] UNEP. Life Cycle Assessment: what it is and how to do it, United Nations Publication, first edition, 1996.
- [8] Norma UNE-EN ISO 14040:2006, Gestión ambiental, análisis de ciclo de vida, principios y marco de referencia.
- [9] CONUEE. Información básica de control de demanda eléctrica, 2007.
- [10] NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010, Especificaciones del gas natural.
- [11] Víctor M. Salinas B., Antonio Diego M. y Jesús Porcayo C., Uso de crudo Maya despuntado como combustible alternativo al combustóleo, Boletín IIE (2001).
- [12] Motores de combustión interna y compresores. Víctor Ávila Alvarado, Heriberto Eliezer Cruz Jácome.
- [13] UDELAR, Facultad de Ingeniería. Generadores de vapor.
- [14] Pedro Fernández Díez, Centrales térmicas.
- [15] Thermodynamics 5th Edition, An Engineering Approach. Yunus A. Çengel, Michael A. Boles.
- [16] Robert H. Perry & Don W. Green, Chemical Engineer's Handbook. Ed. McGraw-Hill, 7th Ed, 1999.

[17] PEMEX, Hoja de datos de seguridad para sustancias químicas, GAS NATURAL, Julio del 2000.

[18] Pamela L. Spath & Margaret K. Mann. Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined-Cycle Power Generation System. National Renewable Energy Laboratory, September 2000.

[19] Asociación de Productores de Energías Renovables. Impactos ambientales de la producción de electricidad, Estudio comparativo de ocho tecnologías de generación eléctrica. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

[20] Saeid Mokhatab, William A. Poe, Gary Zatzman, Wim Van Wassenhove, Ahmed Abdel Wahab. Handbook of NATURAL GAS TRANSMISSION AND PROCESSING, second edition, 2012.

Cálculo de combustión y poder calorífico⁷⁴.

CÁLCULO DE COMBUSTIÓN

Combustóleo

Oxígeno y Aire KG/KG COMBUSTIBLE	
% en PESO	AIRE
CARBONO	84.810
HIDROGENO	10.930
AZUFRE	3.390
OXIGENO	0.210
CO2	0.000
NITROGENO	0.200
AGUA LIBRE	0.400
TOTALES	100

CONDICIONES DEL SITIO

ASNM [m] PB = [mbar]

Temperatura bulbo seco °C

Oxígeno y Aire KG/KG COMBUSTIBLE

O2	N2	AIRE
2.260	7.507	9.768
0.867	2.881	3.749
0.034	0.112	0.146
0.002	0.007	0.009
0.000	0.000	0.000
0.200	0.000	0.200
0.400	0.000	0.400
TOTALES	3.159	10.494

kg/cm2 A

humedad aire %

% de O2 en gases (base seca)

PRODUCTOS

CO2	SO2	H2O	N2	O2	GASES
3.108			7.507		10.616
	0.068	0.977	2.881		3.858
			0.146		0.214
			0.007		0.007
			0.00200		0.000
		0.00400			0.002
3.108	0.068	0.981	10.494	0.000	14.653

KG/KG COMBUSTIBLE

CO2	SO2	H2O	N2	O2	GASES
3.108			7.507		10.616
	0.068	0.977	2.881		3.858
			0.146		0.214
			0.007		0.007
			0.00200		0.000
		0.00400			0.002
3.108	0.068	0.981	10.494	0.000	14.653

Exceso de aire %

Aire con exceso seco

Humedad Aire (tabla)

Totales

KG/KG COMBUSTIBLE

CO2	SO2	H2O	N2	O2	GASES
3.108			7.507		10.616
	0.068	0.977	2.881		3.858
			0.146		0.214
			0.007		0.007
			0.00200		0.000
		0.00400			0.002
3.108	0.068	0.981	10.494	0.000	14.653

BALANCE DE MASA

Oxígeno y Aire KG/KG COMBUSTIBLE	
% en Peso	AIRE
29.6600	4.050
4.096	17.703
0.00635	0.112
humedo	17.815

kg agua /kg aire seco

CALCULO del PODER CALORIFICO

% en PESO	PCS BRUTO	PCS NETO
CARBONO	84.81	6,879
HIDROGENO	10.93	3,702
AZUFRE	3.39	76
AGUA LIBRE	0.11641	73
Total poder calorifico	10,657	9,945
	44,609	41,630
	19,182	17,901

agua por kg com

PCS BRUTO

PCS NETO

energía para evaporar el agua libre a presión barométrica del sitio

temperatura saturación °C

calentamiento kcal/kg

evaporación kcal/kg

Delta h kcal/kg

⁷⁴ Fuente: Elaboración propia con datos de la tabla 3.5.2.

Balance en la caldera de combustión por el método de pérdidas⁷⁵.

BALANCE POR MÉTODO DE PERDIDAS

DATOS OBTENIDOS

Combustible	% en peso
CARBONO	84.81
HIDROGENO	10.93
AZUFRE	3.39
OXIGENO	0.21
CO2	0.00
NITROGENO	0.20
AGUA	0.40
cenizas	0.07
TOTAL	100.01

DATOS OPERATIVOS

Horas operación por mes	730
-------------------------	-----

DATOS DEL SITIO

Altura sobre el nivel del mar	m	0
Temperatura ambiente	°C	15.00
Humedad relativa del aire	%	60.00

AGUA DE ALIMENTACIÓN

Temperatura	°C	90.00
-------------	----	-------

CALIDAD AGUA DE ALIMENTACIÓN

Sólidos disueltos Agua Alimentación	ppm	27.00
Máximos sólidos disueltos en el Domo (Tabla @P _{max})	ppm	1,085

COMBUSTIBLE-COMBUSTIÓN

PCS	kJ/kg	44,609
PCI	kJ/kg	41,630
Gasto masa horario combustible	kg/h	80,961

AIRE

Aire teórico	kg/kg	13.65
AIRE SECO TEÓRICO	kg/h	1,105,363
Exceso de aire	%	29.66
AIRE SECO REAL	kg/h	1,433,214
Humedad absoluta aire (calculo)	kg/agua Kg	0.00635
HUMEDAD en el AIRE	kg/h	9,101
Entalpia del agua del aire húmedo	kJ/kg	419

GASES

GASES SECOS	°C	136.00
HUMEDAD LIBRE DEL COMBUSTIBLE	kg/h	1,514,175
HUMEDAD DEL AIRE	kg/h	323.84
AGUA FORMADA EN LA COMBUSTIÓN	kg/h	9,101
GASES HUMEDOS	kg/h	323.84
	kg/h	1,523,923

ENERGÍA SUMINISTRADA

Energía BRUTA de la combustión	MJ/h	3,611,594
ENERGÍA SUMINISTRADA POR EL AIRE SECO	MJ/h	126,842
ENERGÍA SUMINISTRADA POR AGUA en el AIRE	MJ/h	3813
ENERGÍA SUMINISTRADA POR EL COMBUSTIBLE	MJ/h	5486,463051
TOTAL ENERGÍA SUMINISTRADA	MJ/h	3,747,736

PÉRDIDAS

PÉRDIDA por GASES SECOS	MJ/h	252,008
PÉRDIDAS por AGUA FORMADA	MJ/h	241,240
PÉRDIDA por AGUA LIBRE	MJ/h	24,620
SUMA de PERDIDAS COMBUSTIÓN	MJ/h	517,867

EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN	%	86.18
---------------------------------	---	--------------

CÁLCULO de RADIACIÓN

ENERGÍA LIBERADA NOMINAL	MJ/h	3,678,299
ENERGÍA LIBERADA REAL	MJ/h	3,811,594
Radiación	%	0.25

PÉRDIDAS por RADIACIÓN	MJ/h	9,369
PÉRDIDAS INCALCULABLES	MJ/h	37,477

TOTAL PÉRDIDAS	MJ/h	564,714
-----------------------	------	----------------

EFICIENCIA TÉRMICA		84.93
---------------------------	--	--------------

ENERGÍA TRANSFERIDA AL VAPOR	MJ/h	3,183,022
PRODUCCIÓN BRUTA de VAPOR	kg/h	1,038,422
FACTOR DE CARGA de la CALDERA	%	86.54

Vapor necesario para el ciclo

PURGAS

Porcentaje de purgas	%	2.56
PURGAS	kg/h	26,500
ENERGÍA PERDIDA POR PURGA	MJ/h	61,798

Vapor ÚTIL	kg/h	1,011,922
ENERGÍA NETA (Vapor útil)	MJ/h	3,121,224

EFICIENCIA NETA GLOBAL	%	83.28
-------------------------------	---	--------------

DATOS DE PLACA DEL GENERADOR DE VAPOR

Presión normal de operación (manométrica)	Bar	85.00
Temperatura de saturación	tablas	299.27
Temperatura del vapor	°C	520.00
GASTO NOMINAL MÁXIMO CONTÍNUO	kg/h	1,200,000

Presión barométrica (cálculo)	Bar	1.013
Presión ABSOLUTA (Operación=Pb+Pm)	Bar	86.01325
h VAPOR (de tablas)	kJ/kg	3,442
ENERGÍA TRANSFERIDA AL VAPOR	Delta h kJ/kg	3,065
ENERGÍA LIBERADA nominal (100% efíc.)	MJ/h	3,678,299

COMBUSTIBLE

Tipo	Combustible	
Consumo mensual (m3, litros)	litros	59,398,300
Densidad (Kg/m3 o Kg/l)	kg/litros	0.995
Temperatura entrada del combustible	°C	150.00
Temperatura entrada del aire	°C	100.00

GASES DE ESCAPE

Temperatura de gases salida chimenea	°C	172.00
Porcentaje de O2 en gases (base seca)	%	5.00
Exceso de aire	%	29.7

PERDIDAS INCALCULABLES

	%	1.00
--	---	------

(Cálculo de combustión) o DATO
(Cálculo de combustión) o DATO
Consumo mensual/hora por mes(730)*densidad

Hr=	60.00	%
T B. Seco=	15.00	°C

Temperatura media de gases

kg agua por kg combustible	0.004000
análisis de combustión	

CP=	1.041	kJ/kg°C
-----	-------	---------

CP=	0.502	kcal/kg°C
-----	-------	-----------

CP=	1.060	kJ/kg°C
	KJ/kg	
	2,612	delta h=cal hg

factor de conversión mm Btu/MJ	0.00094804
Millones de BTU/hr	3,487
Millones de BTU/hr	3424

⁷⁵ Fuente: Elaboración propia con parámetros de la tabla 4.2.1.

Cálculos para la turbina de vapor⁷⁶.

CONFIGURACIÓN TURBINA DE VAPOR

Termoeléctrica convencional COPAR 2011 (350 MW)

REQUERIMIENTOS

CAPACIDAD NETA REQUERIDA **337,300** kW
 FACTOR NETA REQUERIDA **100** %

DATOS DEL SITIO

ASNM **0** m
 Tempertaura ambiente **15.00** °C
 Presión barométrica **1.01325** bar

Vapor al deareador "pv" **2.00** % de vapor útil
 Presión manométrica **3.00** barm CON valvula reductora
 Presión Abs **4.01325** bar
 hg **2738** kJ/kg

DATOS PARA ANÁLISIS DE TURBINA

	barm	°C	Tsat
Admisión	85.00	520.00	
Extracción	24.00	barm	
Escape	0.10	bara	

Eficiencias TV

adm-ext	90.00	%
ext-cond	85.00	%

Datos de Tablas de vapor

	Admisión	Extracción	Condensado
P	86.01	25.013	0.10
h	3.442		
s	6.749		
hg		2,802	2,584
hf		962	192
sg		6.256	8.149
sf		2.555	0.649
T _{satutación}	300.1	224.0	45.81

ANÁLISIS DE LA TURBINA DE VAPOR

Extracción real

xs2 % =	100.00	113.34 Si se pasa el valor a mas de 100 ponemos "100"
hs	3,047	kJ/kg
Ws	395	kJ/kg
W	355	kJ/kg
Pérdidas	39	

Condensación

xr2 % =	100.00	115.48 Si se pasa el valor a mas de 100 ponemos "100"
S2	6.256	
xs3% =	74.76	
hs=	1,980	kJ/kg
Ws =	1,107	kJ/kg
W =	941	kJ/kg
Real	166	
Pérdidas	166	
xr3 % =	81.70	
s3=	6.776	

Temperatura a proceso **332** °C

hr2	3,087	kJ/kg
hr3	2,146	kJ/kg

CALCULO DE GASTO MASA A CONDENSACIÓN Y TOTAL

Eficiencia cople y generador **0.975**

Potencia mecánica requerida neta	345,949	kWt
Usos propios	3.6285	%
Potencia mecánica requerida bruta	358,974	

MEDIA OPERATIVA **1,292,306,734** kJ/h

1-pv= 0.98

Vapor a condensación mc = **991,684** kg/hr
 Vapor extracción (Medio operativo) me = **0**
 Vapor al deareador md = **20,238**

	mT	mc	
Masas	1,011,922	991,684	20238.4392
Delta h	355	941	
Wm bruto	359,302	933,005	suma
Capacidad bruta			358,974
			350,000
Capacidad neta			337,300

Consumo específico **3.00** kg vapor por kW neto

⁷⁶ Fuente: elaboración propia.

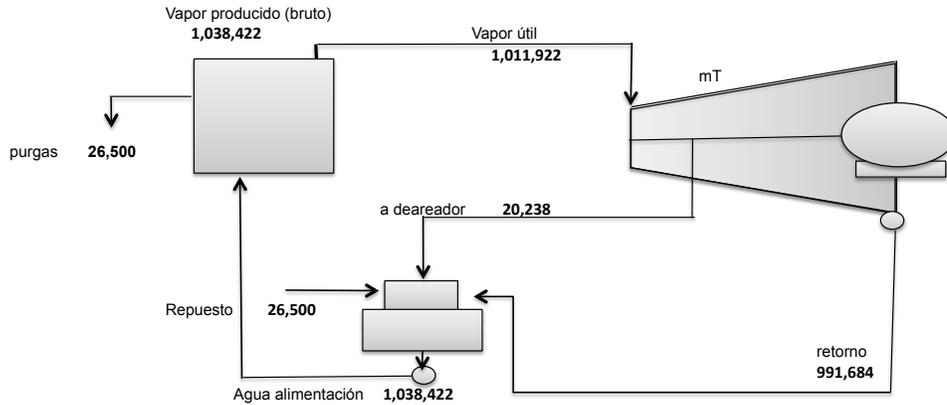
ANÁLISIS DEL CICLO

purgas	2.55	%
Temperatura agua repuesto	15	°C
Retorno de proceso	65	%
Temperatura retorno de proceso	221.80	

Vapor útil
 Vapor Producido (bruto)
 Purgas = $Vp \cdot \%p$
 Vapor al deareador
 Vapor a proceso
 Retorno de proceso
 Vapor a condensación
 Retorno condensado
 Agua de repuesto

kg/h	h kJ/kg	hf kJ/kg
1,011,922		
1,038,422	3,442	
26,500	2,749	63
20,238	2,738	
0	3,087	
0		962
991,684	2,146	
991,684		192
26,500		63

BALANCE DE MASA



Balade de energía en el deareador

entra =	247,303,217	kcal/h
haa =	238	kJ/kg
Taa =	56	°C

Balace energía en la caldera

Calor transferido Bruto	Qt =	3,326,935	MJ/h	100	%
Energía Liberda combustible	Ei =	3,326,935	MJ/h	100	
Calor transferido util	Qt util =	3,242,032	MJ/h	97.44801512	
Calor de purgas	Qp =	71,190	MJ/h	2.14	

Energía eléctrica bruta

EEB	1,259,999	MJ/h
EEN	1,214,280	MJ/h
	36.50	

EFICIENCIA NETA DEL CICLO

36.50	%
-------	---

Consumos de agua en Plantas⁷⁷.

CONSUMOS DE AGUA
(miles de metros cúbicos por año)

Central	Número de unidades	Capacidad por unidad (MW)		Consumo de agua [l/h]			Consumo de agua [l/kwh netos]					
		Bruta	Neta	Agua de servicios	Agua de repuesto al ciclo	Agua de enfriamiento	Total	Agua de servicios	Agua de repuesto al ciclo	Agua de enfriamiento	Total	
Termoeléctrica convencional	2	350.00	337.30	441.50	242.87	9,869.08	1,126,607.31	1,204,731.74	0.149421	0.082197	3.340075	3.571692
	2	160.00	153.76	201.83	99.34	4,567.70	521,426.94	555,807.08	0.149844	0.073752	3.391174	3.614770
	2	84.00	80.61	105.96	67.14	2,608.85	297,813.93	317,574.20	0.150054	0.095080	3.694503	3.939638
2_/Turbogás aeroderivada gas	1	41.59	41.04	26.23			2,994.29	2,994.29	0.072960			0.072960
	1	102.79	100.90	64.83			7,400.68	7,400.68	0.073347			0.073347
2_/Turbogás industrial gas	1	84.77	83.76	53.47			6,103.88	6,103.88	0.072873			0.072873
	1F	186.61	184.52	117.70			13,436.07	13,436.07	0.072816			0.072816
	1G	258.44	255.49	163.00			18,607.31	18,607.31	0.072830			0.072830
2_/Turbogás aeroderivada diesel	1	39.15	38.52	24.69			2,818.49	2,818.49	0.073170			0.073170
2_/Ciclo Combinado gas	1F X 1	283.36	277.06	178.72	22.53	2,208.42	252,102.74	275,076.48	0.073637	0.009283	0.909921	0.992841
	2F X 1	569.73	556.59	359.34	44.26	4,427.73	505,448.63	551,521.69	0.073700	0.009078	0.908117	0.990894
	3F X 1	853.32	834.22	538.21	65.35	6,594.94	752,847.03	821,746.58	0.073649	0.008943	0.902456	0.985048
	1G X 1	372.02	364.57	234.64	29.33	2,897.80	330,799.09	360,932.65	0.073471	0.009184	0.907368	0.990023
	2G X 1	753.82	738.28	475.45	57.99	5,839.31	666,587.90	727,482.88	0.073516	0.008967	0.902893	0.985375
	3_/Combustión interna	1	42.20	40.53	26.62			3,038.81	3,038.81	0.074977		
3_/Combustión interna	2	18.40	17.05	23.21			2,649.54	2,649.54	0.155398			0.155398
	3	3.60	3.27	6.81			777.40	777.40	0.237736			0.237736
	2	350.00	324.79	1,103.76	263.09	10,547.30	1,204,029.68	1,360,062.79	0.387943	0.092469	3.707102	4.187514
Carboeléctrica	1	700.00	625.56	1,103.76	263.25	8,006.81	914,019.41	1,070,070.78	0.201420	0.048039	1.461122	1.710581
Carb. Supercrítica c/desulf.	1	1,400.00	1,351.00	883.01		21,589.41	2,464,544.52	2,565,344.75	0.074612		1.824237	1.898849
Nuclear	1	1,400.00	1,351.00	883.01		21,589.41	2,464,544.52	2,565,344.75	0.074612		1.824237	1.898849
Geotermoeléctrica												
Cerro Prieto	4	26.95	24.97	67.99			7,761.42	7,761.42	0.310830			0.310830
Los Azules	4	26.60	24.98	67.11			7,660.96	7,660.96	0.306684			0.306684
Hidroeléctricas												
Aguamilpa	3	320.00	318.00									
Agua Prieta	2	120.00	119.40									
El Cajón	2	375.00	373.13									
Caracol	3	200.00	199.00									
Chicoasén	5	300.00	298.50									
Peñitas	4	105.00	104.48									
Zimapán	2	146.00	145.27									

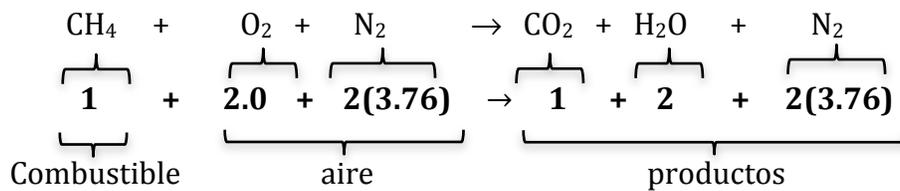
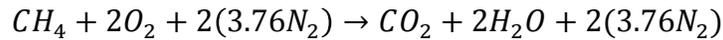
⁷⁷ Fuente: Elaboración propia con datos de Consumos de agua COPAR.

Composición del gas natural.

Tabla B-1 Composición del gas natural⁷⁸.

COMPOSICION E INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES			
MATERIAL	%	Número CAS (Chemical Abstracts Service)	LEP (Límite de Exposición Permisible)
Gas Natural (Metano)	88	74-82-8	Asfixiante Simple
Etano	9		
Propano	3		
Etil Mercaptano	17-28 ppm		Odorífico

La combustión del metano (CH₄) en el aire está representada por la siguiente ecuación:



Por tanto, el aire requerido será:

$$2+2(3.76) = 9.52 \text{ [m}^3\text{] de aire por cada 1 [m}^3\text{] de metano (CH}_4\text{)}$$

del cual:

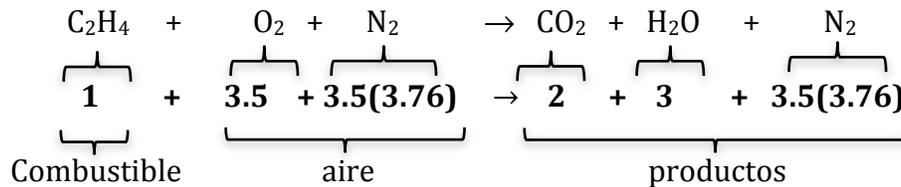
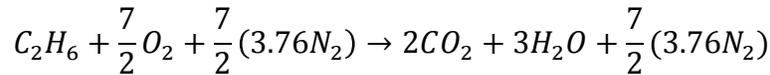
$$\begin{array}{l}
 2.0 \text{ [m}^3\text{] son de O}_2 \text{ y,} \\
 7.52 \text{ [m}^3\text{] son del N}_2
 \end{array}$$

Además se emiten:

$$\begin{array}{l}
 1 \text{ [m}^3\text{] de CO}_2 \text{ por cada 1 [m}^3\text{] de CH}_4 \text{ ,} \\
 2 \text{ [m}^3\text{] de H}_2\text{O (vapor seco) por cada 1 [m}^3\text{] de CH}_4 \text{ y,} \\
 7.52 \text{ [m}^3\text{] de N}_2 \text{ por cada 1 [m}^3\text{] de CH}_4 \text{ .}
 \end{array}$$

⁷⁸ Fuente: Hoja de datos de seguridad para sustancias químicas, GAS NATURAL, PEMEX.

La combustión del etano (C_2H_6) en el aire está representada por la siguiente ecuación:



Por tanto, el aire requerido será:

$$3.5 + 3.5(3.76) = \mathbf{16.66} \text{ [m}^3\text{] de aire por cada 1 [m}^3\text{] de metano (C}_2\text{H}_6\text{)}$$

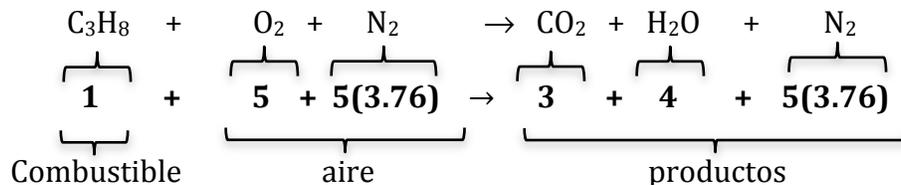
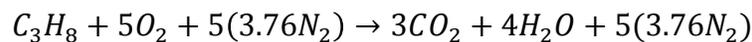
del cual:

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{3.5} \text{ [m}^3\text{] son de O}_2 \text{ y,} \\
 \mathbf{13.16} \text{ [m}^3\text{] son del N}_2
 \end{array}$$

Además se emiten:

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{2} \text{ [m}^3\text{] de CO}_2 \text{ por cada 1 [m}^3\text{] de C}_2\text{H}_6, \\
 \mathbf{3} \text{ [m}^3\text{] de H}_2\text{O (vapor seco) por cada 1 [m}^3\text{] de C}_2\text{H}_6, \\
 \mathbf{13.16} \text{ [m}^3\text{] de N}_2 \text{ por cada 1 [m}^3\text{] de C}_2\text{H}_6.
 \end{array}$$

La combustión del propano (C_3H_8) en el aire está representada por la siguiente ecuación:



Por tanto, el aire requerido será:

$$5 + 5(3.76) = \mathbf{23.8} \text{ [m}^3\text{] de aire por cada 1 [m}^3\text{] de propano (C}_3\text{H}_8\text{)}$$

del cual:

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{5} \text{ [m}^3\text{] son de O}_2 \text{ y,} \\
 \mathbf{18.8} \text{ [m}^3\text{] son del N}_2
 \end{array}$$

Además se emiten:

3 [m³] de CO₂ por cada 1 [m³] de C₃H₈ ,
4 [m³] de H₂O (vapor seco) por cada 1 [m³] de C₃H₈ y,
18.8 [m³] de N₂ por cada 1 [m³] de C₃H₈.

Los componentes de la tabla están dados en porcentaje en volumen pero se pueden obtener los porcentajes en peso de cada elemento para así analizar de manera “mas fácil ” las emisiones contaminantes en kilogramos con las ecuaciones anteriores. Dado que el compuesto Etil Mercaptano (C₂H₆S) es muy pequeño en comparación con los otros compuestos se considerará su valor como cero.

$$\therefore \text{Gas Natural} = 0.88 \times CH_4 + 0.09 \times C_2H_6 + 0.03 \times C_3H_8$$

$$PM = 0.88 \times (1 \times 12 + 4 \times 1) + 0.09(2 \times 12 + 6 \times 1) + 0.03(3 \times 12 + 8 \times 1)$$

$$PM = \mathbf{18.1}$$

$$\%C_{(en\ peso)} = \frac{0.88 \times (1 \times 12) + 0.09(2 \times 12) + 0.03(3 \times 12)}{18.1}$$

$$\%C_{(en\ peso)} = \mathbf{76.2421}$$

$$\%H_{(en\ peso)} = \frac{0.88 \times (4 \times 1) + 0.09(6 \times 1) + 0.03(8 \times 1)}{18.1}$$

$$\%H_{(en\ peso)} = \mathbf{23.7569}$$

Cálculos de combustión del gas natural⁷⁹.

CÁLCULO DE COMBUSTIÓN

Densidad [kg/m³]

Gas Natural	Oxígeno y Aire KG/KG COMBUSTIBLE				KG/KG COMBUSTIBLE					
	% en PESO	O2	N2	AIRE	CO2	SO2	H2O	N2	O2	GASES
CARBONO	76.242	2.032	6.749	8.781	2.794			6.749		9.543
HIDROGENO	23.757	1.885	6.262	8.148			2.123	6.262		8.385
AZUFRE	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000		0.000
OXIGENO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			0.000		0.000
CO2	0.000				0.000			0.00000		0.000
NITROGENO	0.000							0.00000		0.000
AGUA LIBRE	0.000						0.00000			0.000
TOTALES	100	3.917	13.011	16.928	2.794	0.000	2.123	13.011	0.000	17.928

CONDICIONES DEL SITIO	
ASNM	<input type="text" value="0"/> [m]
Temperatura bulbo seco	<input type="text" value="15.00"/> °C
	PB = <input type="text" value="1.013.25"/> [mbar]
	<input type="text" value="1.000"/> kg/cm2 A
	humedad aire %
	% de O2 en gases (base seca)
	HR <input type="text" value="60.00"/>
	<input type="text" value="5.00"/>

BALANCE DE MASA	
Oxígeno y Aire KG/KG COMBUSTIBLE	
% en Peso	<input type="text" value="28.0200"/>
Exceso de aire %	<input type="text" value="1.098"/>
Aire con exceso seco	<input type="text" value="5.015"/>
Humedad Aire (tabla)	<input type="text" value="16.657"/>
Humedad Aire /kg aire seco	<input type="text" value="0.138"/>
Totales	<input type="text" value="21.809"/>

CÁLCULO del PODER CALORIFICO	
Oxígeno y Aire KG/KG COMBUSTIBLE	
CO2	<input type="text" value="2.794"/>
SO2	<input type="text" value="0.000"/>
H2O	<input type="text" value="2.261"/>
N2	<input type="text" value="16.657"/>
O2	<input type="text" value="1.098"/>
GASES	<input type="text" value="22.809"/>
Totales	<input type="text" value="21.809"/>

CÁLCULO del PODER CALORIFICO	
[kg/m ³]	
CO2	<input type="text" value="1.705"/>
SO2	<input type="text" value="0.000"/>
H2O	<input type="text" value="1.379"/>
N2	<input type="text" value="10.161"/>
O2	<input type="text" value="0.670"/>
GASES	<input type="text" value="13.914"/>

Energía para evaporar el agua libre a presión barométrica del sitio	
temperatura saturación	<input type="text" value="100"/> °C
calentamiento	<input type="text" value="85"/> kcal/kg
hf - haa =	<input type="text" value="539"/> kcal/kg
evaporación	<input type="text" value="624"/> kcal/kg
Delta h	<input type="text" value="624"/> kcal/kg

CÁLCULO del PODER CALORIFICO	
[kg/m ³]	
PCi neto	<input type="text" value="6.184"/> kcal/kg
PCs bruto	<input type="text" value="6.822"/> kcal/kg
agua por kg com	<input type="text" value="0"/> kcal/kg
agua por kg com	<input type="text" value="86"/> kcal/kg
agua por kg com	<input type="text" value="14.230"/> kcal/kg
agua por kg com	<input type="text" value="59.565"/> kJ/kg
agua por kg com	<input type="text" value="25.613"/> Btu/lb
agua por kg com	<input type="text" value="8.680"/> [kcal/m3]
agua por kg com	<input type="text" value="36.334"/> [kJ/m3]
agua por kg com	<input type="text" value="7.881"/> [kcal/m3]
agua por kg com	<input type="text" value="32.991"/> [kJ/m3]

⁷⁹ Fuente: Elaboración propia con datos de la tabla B-1 convertidos a porcentaje en peso.

Cálculos de combustible.

Para el ciclo combinado se opto por tomar el poder calorífico de la tabla 3.6.3.3 y no el calculado anteriormente ya que no se realizo el análisis matemático de todo el ciclo por que en el análisis anterior de la plata termoeléctrica, los valores calculados se asemejan a los calculados con las tablas del COPAR.

PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE LOS COMBUSTIBLES

Combustible	unidad	MJ	kWh	BTU	kcal
Combustóleo domestico	l	41.68	11.58	39,518.95	9,958.78
	gal	157.79	43.83	149,595.24	37,698.00
	bbl	6,627.25	1,840.92	6,283,000.00	1,583,316.00
Combustóleo empresas eléctricas USA	l	41.71	11.59	39,544.11	9,965.12
	gal	157.89	43.86	149,690.48	37,722.00
	bbl	6,631.46	1,842.09	6,287,000.00	1,584,324.00
Gas natural doméstico	m ³	36.84	10.23	34,926.02	8,801.36
	ft ³	1.04	0.29	989.00	249.23
Gas natural empresas eléctricas USA	m ³	38.18	10.61	36,197.34	9,121.73
	ft ³	1.08	0.30	1,025.00	258.30
Diesel doméstico	l	38.69	10.75	36,675.95	9,242.34
	gal	146.44	40.68	138,833.33	34,986.00
	bbl	6,150.48	1,708.48	5,831,000.00	1,469,412.00
Diesel empresas eléctricas USA	l	38.65	10.73	36,638.22	9,232.83
	gal	146.29	40.64	138,690.48	34,950.00
	bbl	6,114.15	1,706.73	5,825,000.00	1,467,900.00
Carbón doméstico	kg	18.50	5.14	17,539.00	4,419.83
	lb	8.39	2.33	7,955.64	2,004.82
Carbón importado en Petacalco (1% de S)	kg	26.28	7.30	24,912.24	6,277.88
	lb	11.92	3.31	11,300.12	2,847.63
Uranio enriquecido	g	4,017.70	1,116.04	3,809,000.00	959,868.00
Vapor geotérmico Cerro prieto	ton	2,780.10	772.31	2,635,812.81	664,165.89
Capor geotérmico Los Azufres	ton	2,764.90	768.09	2,621,401.69	660,534.61

Central	Número de Unidades	Capacidad por unidad (MW)		Eficiencia (%)		Régimen Térmico (kJ/kWh)		Consumo Especifico (U/MWh)		Unidad
		Bruta	Neta	Bruta	Neta	Bruta	Neto	Bruta	Neto	
Ciclo combinado gas	2Gx1	753.82	738.28	51.53	50.47	6,986	7,133	186.6	193.62	m ³

Consumo de combustible

Con consumo específico	
Bruto	Neto
140,663	142,946 [m ³ /h]
109,717	111,498 [kg/h]
Unitario=	0.1936 [m ³ /kWh]
Unitario=	0.1510 [kg/kWh]

Con el régimen térmico	
energía tot	5,266,187 [MJ/h]
Con 100% de carga	
CONSUMO:	142,948 [m ³ /h]
	111,499 [kg/h]
Unitario=	0.1936 [m ³ /kWh]
Unitario=	0.1510 [kg/kWh]

