



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

“ZARAGOZA”.



SIMULACIÓN DE UN CICLO DE POTENCIA RANKINE OPERADO CON HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

T E S I S

OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

GONZÁLEZ DOMÍNGUEZ CINTLI YOATZIN

DIRECTOR DE TESIS

M. EN I. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

"ZARAGOZA"

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JC/IQ/ 186/14

ASUNTO: Asignación de Jurado

Alumno (a): González Domínguez Cintli Yotzín

PRESENTE

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I.Q. MIGUEL JOSÉ FLORES GALAZ
VOCAL	M. en L. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO
SECRETARIO	DR. JOSÉ ÁNGEL ROJAS ZAMORANO
SUPLENTE	I.Q. ALEJANDRO JUVENAL GUZMÁN GÓMEZ
SUPLENTE	M. en L. MARÍA ESTELA DE LA TORRE GÓMEZ
	TACLE

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

México D.F. a 17 de marzo de 2014

JEFE DE CARRERA

DR. ROBERTO ESPINOZA SERRA

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS.

La presente tesis es un esfuerzo y un gran logro para mí, a través de estas líneas expreso mi más profundo y sincero agradecimiento, en primer lugar a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la educación necesaria y de calidad para poder tener mejores herramientas para enfrentarme a la vida y por demostrarme que la educación es para quien la quiere y tiene ganas de ser mejor, también le dedico y agradezco este trabajo a mi querida Facultad de Estudios Superiores Zaragoza de la cual siempre estaré muy orgullosa.

Una especial dedicatoria y mi más grande y profundo agradecimiento a mi madre la Lic. María de los Ángeles Domínguez Mota y a mi padre el Sr. Fernando González Martínez que dentro de sus posibilidades me han apoyado para que logre lo que yo quiero y sueño, por su paciencia, animo, comprensión y regaños, esta gratitud también es extensiva para mis hermanos la Lic. Ixchel Ángeles González Domínguez y Fernando Uriel González Domínguez gracias hermanos por su apoyo incondicional y el ánimo infundido.

Un agradecimiento y dedicatoria muy especial para mí amado esposo Ing. Julio Cesar Jiménez Monjaras por estar siempre a mi lado, por tu apoyo en las buenas y sobre todo en las malas, por ser parte de mi vida, por impulsarme a ser mejor y por compartir junto a mi desde el inicio hasta el final de este camino la carrera de Ingeniería Química.

A mi director de tesis M. en I. Rafael Sánchez Dirzo por su apoyo dirección y paciencia. También agradezco a mis sinodales por este tiempo que le han dedicado a mi trabajo, a mis profesores que me brindaron sus conocimientos y me guiaron durante mi estadía en la carrera, a mis compañeros y amigos.

Agradezco a todos aquellas personas que con su apoyo han colaborado en mi realización como profesionista.

Con todo mi amor y mi eterno agradecimiento.

Cintli Yoatzin González Domínguez.

“QUERER ES PODER”

“LO IMPORTANTE EN ESTA VIDA NO ES EL TRIUNFO SINO LA LUCHA. LO ESENCIAL NO ES HABER VENCIDO, SINO HABER LUCHADO BIEN”.

Barón Pierre de Coubertin.

“CUIDA TUS PENSAMIENTOS PORQUE SE VOLVERÁN ACTOS. CUIDA TUS ACTOS, PORQUE SE HARÁN COSTUMBRE. CUIDA TUS COSTUMBRES PORQUE FORMARAN TU CARÁCTER. CUIDA TU CARÁCTER PORQUE FORMARAN TU DESTINO. Y TU DESTINO SERÁ TU VIDA”

Gandhi.

HAY UNA FUERZA MOTRIZ MÁS PODEROSA QUE EL VAPOR, LA ELECTRICIDAD Y LA ENERGÍA ATÓMICA: LA VOLUNTAD.

Albert Einstein.

INDICE.

ABSTRACT.....	8
RESUMEN.....	8
JUSTIFICACIÓN.....	10
OBJETIVOS.....	11
Capítulo 1 Energías renovables.....	13
1.1 Antecedentes.....	14
1.2 Beneficios de las energías renovables.....	17
1.3 Tipos de energías renovables.....	20
1.3.1 Radiación solar (energía solar).....	21
1.3.2 Energía eólica.....	23
1.3.3 Biomasa.....	25
1.3.4 Energía geotérmica.....	27
1.3.5 Energía hidráulica.....	29
1.3.6 Energía Nucleoeléctrica.....	31
1.3.7 Energía Oceanomotriz.....	33
Capítulo 2 Dilema de la energía: alternativas de solución.....	40
2.1 Sistema energético Mexicano.....	40
2.2 Demanda energética, más consumo y menos emisiones.....	41
2.3 Combustibles fósiles en México.....	49
2.4 Generación de vapor utilizando hidrógeno como combustible.....	50
Capítulo 3 Sistemas de ingeniería para la transformación de energía eléctrica.....	53
3.1 Comparación entre la generación de electricidad quemando hidrocarburos y la generada con agua.....	53
3.2 Sistemas híbridos.....	57
3.3 Proceso de transformación de la energía química en eléctrica.....	60
Capítulo 4 Ciclos de potencia para el vapor.....	64
4.1 Fundamentos de los ciclos termodinámicos de potencia de vapor.....	64
4.2 Ciclo de Carnot.....	65
4.3 Ciclo Rankine.....	67
4.4 Incremento de la eficiencia del ciclo Rankine.....	70
4.4.1 Efectos de la presión y temperatura para el ciclo Rankine.....	71

4.4.2 Sobrecalentamiento del vapor	74
4.4.3 Recalentamiento	76
4.4.4 Regeneración	78
4.5 Cogeneración	82
4.6 Trigeneración	85
4.6.1 Los beneficios de un sistema de trigeneración	87
Capítulo 5 Hidrógeno como combustible	90
5.1 Generalidades	91
5.2 Propiedades del hidrógeno	92
5.2.1 Propiedades físicas	94
5.2.2 Propiedades químicas	94
5.3 Normas de seguridad para el hidrógeno	95
5.4 Hoja de seguridad del hidrógeno.....	98
5.5 Producción del hidrógeno.....	102
5.5.1 Electrólisis.....	103
5.6 Planta de electrolisis para la obtención del hidrógeno	108
5.6.1 Compresión	110
5.6.2 Almacenamiento	113
Capítulo 6 Simulación del prototipo para 10W, 100W, 100KW, 100MW, y 1GW.	121
6.1 Propuesta	121
6.2 Descripción General	121
6.3 Simulación	128
6.4 Filosofías de operación y control.....	137
Capítulo 7 Cálculos.....	143
7.1 Cálculo del ciclo Rankine	143
Resultados y Conclusiones.....	149
Lista de figuras	167
Lista de gráficas	168
Lista de tablas	169
Nomenclatura	170
Glosario.....	172
Anexos	174
A.1 Procedimiento para la utilización del simulador PRO II	174

A.2 Turbina de vapor.....	188
A.3 Velocidades admisibles usuales para los sistemas de ductos y tuberías.	191
A.4 Valores del coeficiente global de transferencia de calor.	192
A.5 Memoria de Cálculo para la potencia de 1 GW.	192
A.6 Poder calorífico de los combustibles.....	195
BIBLIOGRAFÍA.	196
Páginas de internet.	199

ABSTRACT.

The general idea is to use hydrogen and oxygen obtained by breaking water molecules via electrolysis, making it react and to obtain water vapor at 3000 ° C.

This enters the steam Rankine cycle power and generates 1 GW electric power, 100 MW, 100 KW, 100 W and 10 W simulated in PRO II program and as a by product we obtain liquid water by electrolysis subsequently re-decomposed into the primary elements (energy vectors) for this cycle.

RESUMEN.

En el presente trabajo se propone la simulación de un ciclo Rankine para la generación de energía eléctrica haciendo uso de la energía producida durante el ciclo por la reacción del hidrogeno con el oxígeno.

En este proyecto se realizaron los balances de masa y energía para poder simular el ciclo Rankine para diferentes potencias propuestas las cuales son: 1 GW, 100 MW, 100 KW, 100 W, 10 W.

La idea general es utilizar hidrógeno y oxígeno obtenidos por el rompimiento de las moléculas de agua mediante la electrólisis, haciéndolo reaccionar y así obtener vapor de agua a 3000° C. Este vapor entra al ciclo de potencia Rankine y generara las potencias eléctricas requeridas como producto final y como subproducto obtendremos agua en estado líquido que posteriormente mediante la electrólisis se vuele a descomponer en los elementos primarios para este ciclo.

Ya que se obtiene el hidrógeno nuevamente y como éste es un vector energético primario, se puede almacenar y tener reserva para lograr operar una planta de generación de potencia eléctrica de manera continua.

Podemos resaltar que en este ciclo de potencia simulado no se tienen emisiones de contaminantes ni se requieren tratamientos especiales a los productos de combustión. Desde el punto de vista ambiental existen ventajas notables al utilizar

el hidrógeno frente al uso de hidrocarburos ya que existe una limpieza en su empleo y en su consumo, finalmente obtenemos como subproducto agua.

Se obtuvieron simulaciones del ciclo de potencia Rankine sin embargo tuvimos la necesidad de eliminar el quemador que el simulador PRO II nos proporciona debido a que no es útil para el proyecto y el quemador que nosotros necesitamos es el propuesto en la tesis Gustavo Herrera Olivares (2011) "Tesis: Diseño de un generador de vapor que utiliza hidrógeno como combustible". M en I. Rafael Sánchez Dirzo. Para obtener el título de ingeniero químico UNAM FES Zaragoza. Ingeniería Química.

Como se mencionó anteriormente las potencias propuestas del simulador fueron: 1 GW, 100 MW, 100KW, 100W y 10 W, por medio de este simulador usando como base la potencia de 1 GW pudimos obtener las condiciones de Presión, Temperatura, Flujo Másico requerido de cada una de las corrientes en cada una de las potencias.

Por lo tanto consideramos que esta propuesta es viable para la generación de vapor y a su vez de energía eléctrica limpia, renovable e inagotable y la cual es capaz de proporcionar agua limpia como subproductos.

JUSTIFICACIÓN.

La elección del presente tema de tesis surge de la imperante necesidad de reemplazar las ya existentes fuentes de energía debido a la creciente crisis que atraviesa la industria del petróleo y a los constantes cambios climáticos que aquejan al mundo debido al calentamiento global.

Como Ingenieros Químicos no sólo nos enfrentamos a la necesidad de resolver problemas en la industria, sino también a la necesidad de ejercer las profesiones de forma responsable, siempre preocupadas y ocupadas del entorno que nos rodea y del impacto en la sociedad. Por ello se hace la siguiente propuesta en donde se explota el potencial del hidrógeno como combustible para la generación de vapor motriz, el cual posee un gran poder calorífico y es un combustible 100% libre de emisiones contaminantes.

Por estos motivos en este trabajo se realizó la adaptación de un Ciclo de Potencia Rankine con el objeto de que éste opere con hidrógeno como combustible; ya que dicho Ciclo de Potencia está diseñado para operar mediante una reacción de combustión de hidrocarburos, en este proyecto se propone generar los mismos beneficios del Ciclo Rankine pero de una forma ecológica, económica, responsable con el medio ambiente y con una reacción transformable, es decir, con el ciclo físico- químico del agua.

OBJETIVOS.

General.

El objetivo de esta tesis es la simulación de un ciclo de Potencia Rankine con el propósito que este genere energía eléctrica renovable y limpia a diferentes potencias utilizando hidrogeno como combustible y así poder saber las condiciones de operación para cada una de las potencias propuestas.

PARTICULARES.

- A) Adaptar un paquete de simulación que describa y prediga la operación de un Ciclo de Potencia Rankine que funcione con hidrógeno como combustible.
- B) Aplicar tal paquete para simular cinco ciclos Rankine operado con hidrógeno. El primero de una potencia de 10 W. El segundo de una potencia de 100 W, el tercero de 100 KW, el cuarto de 100MW, y finalmente el quinto de 1GW.

HIPOTESIS.

La simulación nos permitirá predecir las condiciones óptimas mediante las cuáles el Ciclo Rankine puede operar haciendo uso del hidrógeno como combustible; tomando como referencia las siguientes potencias a calcular: 10W, 100W, 100KW, 100MW y 1GW.

CAPITULO 1

ENERGÍAS

RENOVABLES.

Capítulo 1 Energías renovables.

La energía es la capacidad que tiene un cuerpo o un sistema para realizar un trabajo, ésta es medida en Joules, se puede manifestar en distintas formas como son: mecánica, eléctrica, calorífica, etcétera, que pueden transformarse unas en otras.¹ Las fuentes de energía convencionales son de origen hidráulico (utiliza el agua) y químico (hidrocarburos y nucleares), pero su consumo excesivo obliga a la búsqueda de energías alternativas, ecológicas y renovables.²

Las energías renovables son una alternativa a otras energías tradicionales y producen un impacto ambiental mínimo, sin destrucción del medio ambiente, además reversibles, lo que ha dado un buen resultado a la escasez de fuentes de energías convencionales en todo el mundo, pueden explotarse ilimitadamente, es decir, su disponibilidad no disminuye conforme se utilizan, son de origen natural.² Algunas son:²

- Radiación Solar: Se debe a la radiación del sol.
- Energía Eólica: producida por el movimiento del viento.
- Biomasa: Utiliza la descomposición de residuos orgánicos.
- Energía Geotérmica: Uso del vapor de agua que surge bajo presión desde el subsuelo.
- Energía Hidráulica: Derivada de la caída del agua (hidroeléctrica).
- Energía del Hidrógeno: Utilización de hidrogeno como combustible.
- Energía Oceanomotriz: Derivada del mar (mareas, corrientes marinas, gradientes de temperatura y gradientes salinos).⁴

Como se muestra en las siguientes figuras (1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6).



FIGURA 1.2 Radiación solar



FIGURA 1. 1 Energía Eólica

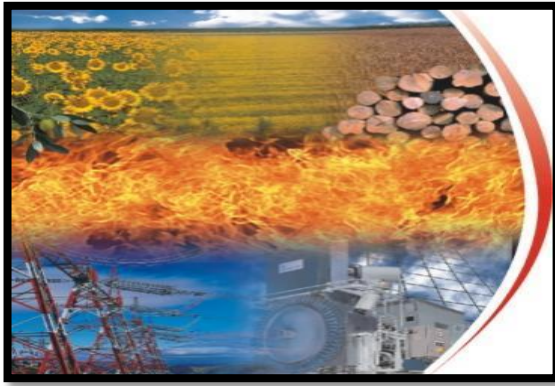


FIGURA 1.4 Biomasa. Fuente: Gregorio Gil García, (2008). "Energías del siglo XXI, de las energías fósiles a las alternativas". Ediciones Mundi-Prensa. Páginas 19 a la 52



FIGURA 1.3 Energía Geotérmica. Fuente: Gregorio Gil García, (2008). "Energías del siglo XXI, de las energías fósiles a las alternativas". Ediciones Mundi-Prensa. Páginas 19 a la 52



FIGURA 1.5 Energía Hidroeléctrica. Fuente: Gregorio Gil García, (2008). "Energías del siglo XXI, de las energías fósiles a las alternativas". Ediciones Mundi-Prensa. Páginas 19 a la 52

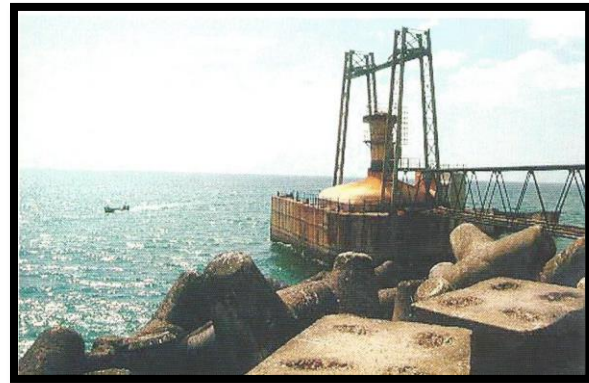


FIGURA 1.6 Energía Oceanomotriz. Gregorio Gil García, (2008). "Energías del siglo XXI, de las energías fósiles a las alternativas". Ediciones Mundi-Prensa. Páginas 19 a la 52

1.1 Antecedentes.

A finales de los ochentas y la década de los noventas la sociedad ha sufrido una transformación muy importante con respecto a la energía. Generalmente ésta se obtiene de combustibles fósiles y/o de la fisión nuclear pero hoy en día existen otros medios de obtenerla.¹

Las emisiones de estas energías han provocado la alteración del clima en nuestro planeta y el uso excesivo de hidrocarburos se ha provocado una crisis energética, esto es comprobado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el

Cambio Climático, usan el término “cambio climático” para referirse al cambio por causas humanas, las modificación del clima con respecto al historial climático a una escala global o regional han ido incrementándose. Tales cambios se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todo los parámetros meteorológicos como: temperatura, presión atmosférica, precipitaciones, nubosidad, lluvias, etcétera.⁴

Es por esto que surge la necesidad de utilizar otras formas de producir energía, ya que son fuentes que no contaminan (o casi no contaminan) y se consideran energías limpias, que no se agotarán (renovables), como lo es el sol y el viento.²

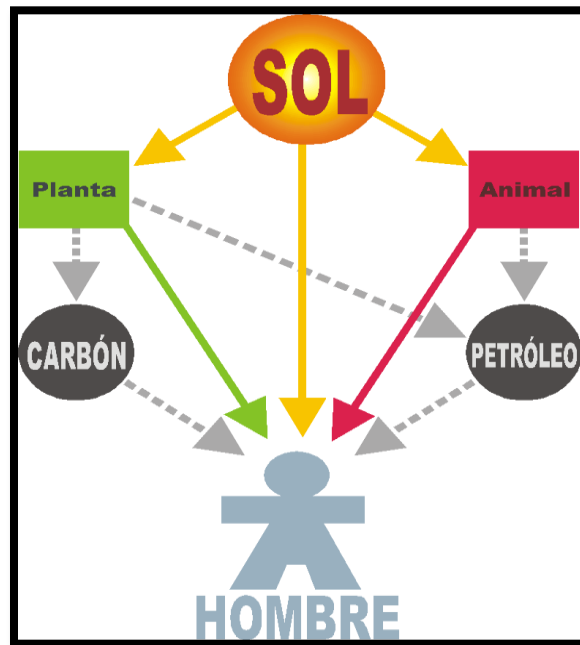


FIGURA 1 7 ENERGÍA Y EL HOMBRE. Fuente: Antonio Madrid, (2009). “Energías renovables (fundamentos, tecnologías y aplicaciones)”. Editorial Mundi-Prensa. Capítulo 1.páginas 3 a la 25.

Estas energías alternativas se encuentran ligadas al hombre desde su origen ya que recibimos energía de una estrella, el sol (figura1.7).

Bajo la denominación de energías renovables, alternativas o blandas, se engloban una serie de fuentes energéticas, como la radiación solar o las centrales hidroeléctricas y eólica. Actualmente estos tipos de energías alternativas suministran un 20% del consumo mundial, éstas no pueden sustituir a las

convencionales por completo, su potencial es enorme, pero han tenido dificultades de todo tipo y esto ha retrasado su desarrollo en el pasado.¹

Las energías renovables solucionarán muchos de los problemas ambientales surgidos del consumo de energías convencionales, como el cambio climático, los residuos radiactivos, las lluvias ácidas y la contaminación atmosférica. La producción, transformación y consumo final de tal cantidad de energía es la causa principal de la degradación ambiental. En la figura 1.8 se muestran las energías del siglo XXI.¹

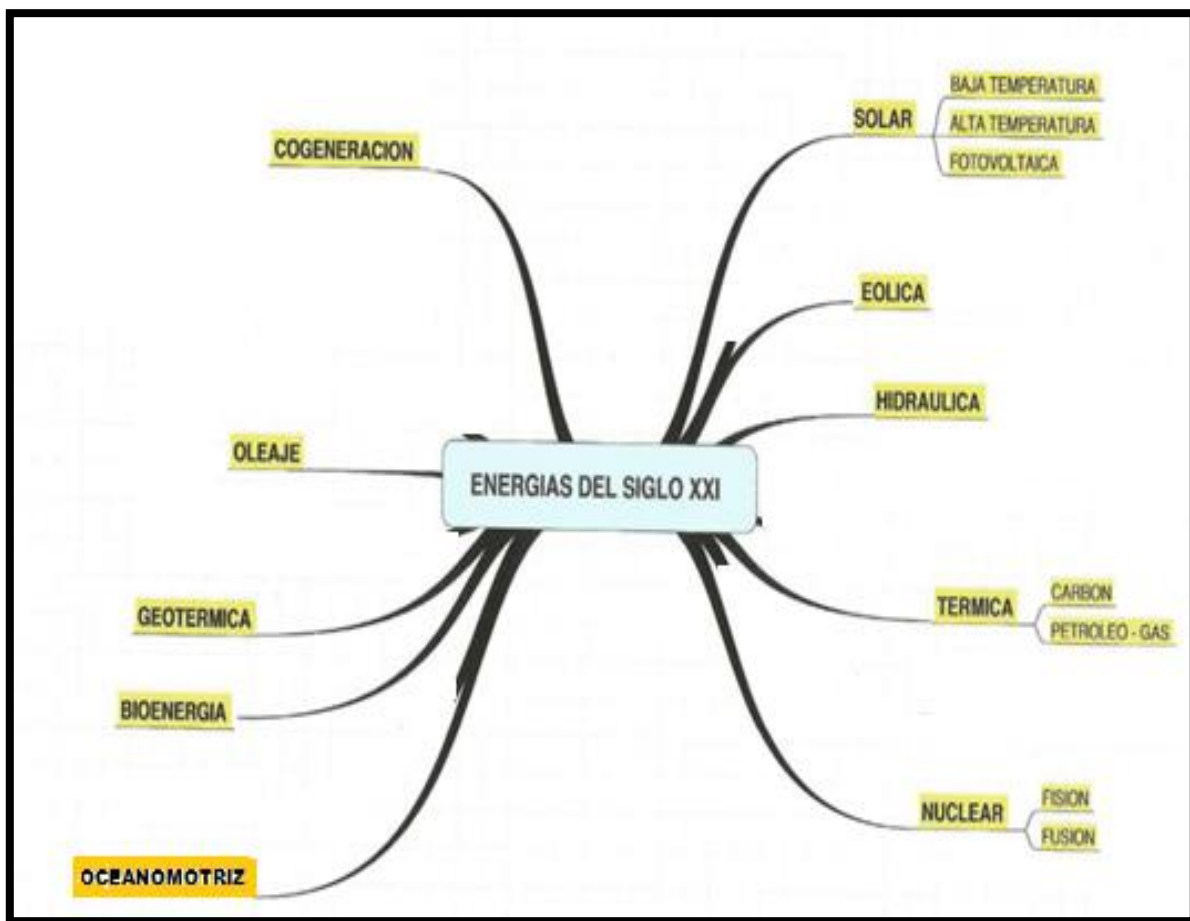


FIGURA 1.8 ENERGÍAS DEL SIGLO XXI. Fuente: Gregorio Gil García, (2008). "Energías del siglo XXI, de las energías fósiles a las alternativas". Ediciones Mundi-Prensa. Capítulo 1, Panorama General de la energía. Páginas 19 a la 52.

Las energías renovables, junto con el ahorro y la eficiencia energética, son el punto clave para un futuro energético limpio, eficaz, seguro y autónomo.

1.2 Beneficios de las energías renovables.

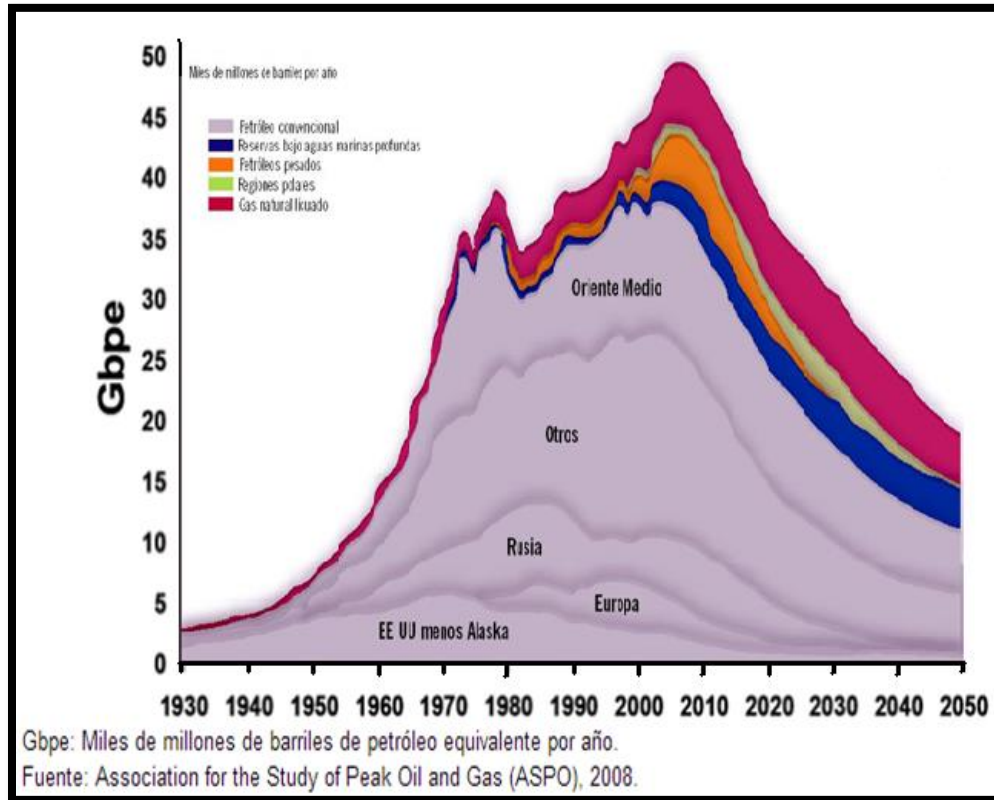
Al invertir en energías renovables se podría obtener innumerables beneficios tales como:

- Abastecer la demanda de energía del país por medio de fuentes sustentables.
- México puede convertirse en potencia mundial de energías renovables (principalmente energía solar, eólica y oceanomotriz)
- Generar nuevos empleos.
- Disminuir sus emisiones de CO₂.

Otro tipo de beneficios son:

- En el medio ambiente: las tecnologías de las energías renovables tienen menos impacto ambiental, menos emisiones contaminantes (casi nulas) que las energías convencionales.
- Energía para el futuro: Las energías renovables, como su nombre lo dice, no desaparecerán nunca (viento, sol, agua, etc.).
- Impulsan el empleo y la economía: las inversiones en proyectos de energías renovables utilizan materiales y recursos humanos para construir y mantener las instalaciones, en lugar de importar recursos energéticos costosos. Generan empleo, recursos económicos y proveen de suministro energético local, en vez de que estos se realicen en otro país.
- Seguridad en el abastecimiento de la energética, al aumentar el uso de fuentes renovables disminuye la dependencia energética de los países exportadores de energía.
- Aumento de la seguridad en el abasto de energía. El futuro del abasto de combustibles fósiles a nivel mundial es un tema que preocupa cada vez más. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA), la producción de petróleo en el mundo aumentará de 82 a 104 millones de barriles al día entre 2007 y 2030. En contraste, algunos analistas de la industria mundial de los hidrocarburos aseguran que nos encontramos ya

en la cima en la curva de producción mundial de hidrocarburos. En la siguiente grafica (1.1) se muestra el escenario de evolución de la producción mundial de hidrocarburos.²



GRÁFICA 1. 1 EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE HIDROCARBUROS. Fuente: ASSOCIATION FOR THE STUDY OF PEAK OIL AND GAS (ASPO), 2008.

Sin duda se podría crecer potencialmente a través de las energías renovables, por lo que seguramente seguiremos escuchando nuevas noticias sobre inversiones de este tipo.

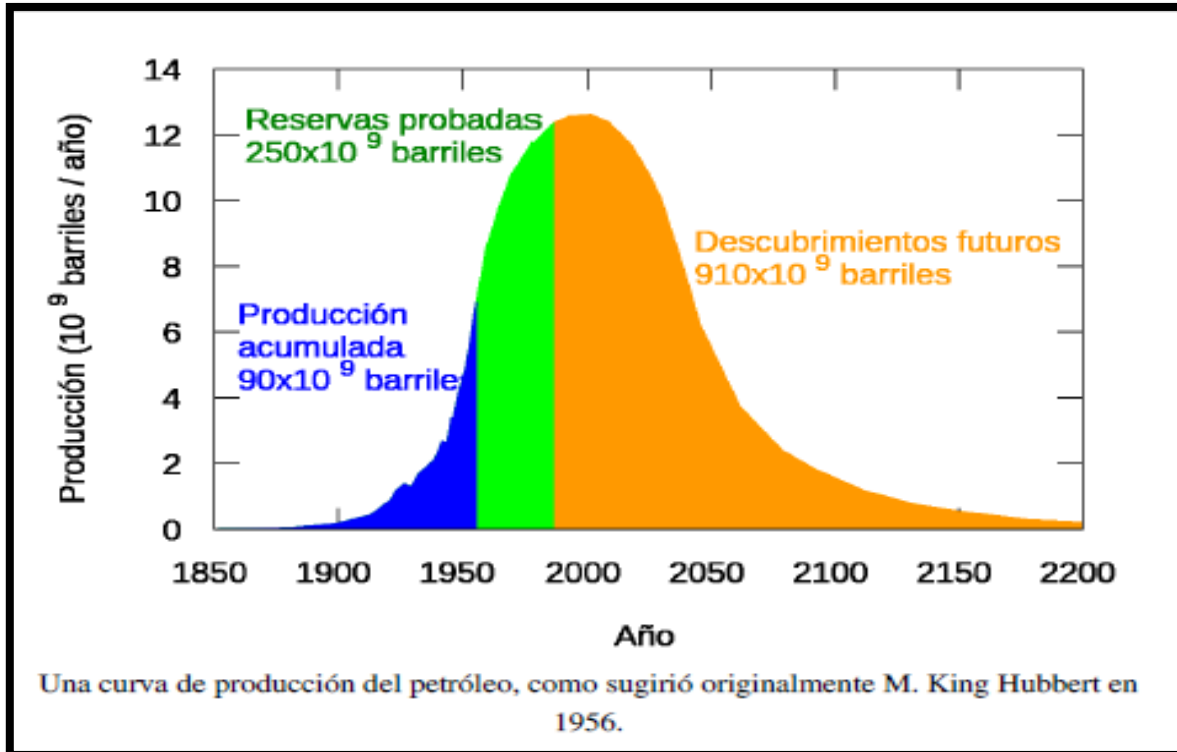
Con este tipo de energías se buscar dar solución a problemas de producción energética actuales (explotación excesiva de hidrocarburos, elevación de costo de la energía por falta de materia prima), a pesar de que estas formas generan energía a gran escala, es una realidad la gran cantidad de contaminantes o desechos tóxicos que son producidos. Si comparamos la producción de energía convencional frente a los sistemas de energía renovable que pueden ser generados de forma local y en pequeña escala, obtenemos que se reduzcan los

costos y los riesgos económicos de la producción, además de satisfacer las necesidades de la industria y a la población de manera amigable con el medio ambiente. Ejemplo de ellos son los calentadores solares de agua o los sistemas de electrificación rural para comunidades aisladas, son las opciones más económicas para sus usuarios. Por tanto, existe un importante ahorro económico.²

Otras energías renovables, tales como la generación de electricidad a partir de energía eólica, pueden ser aparentemente más costosas que las tecnologías convencionales cuando se evalúan de manera aislada. Sin embargo, al analizar el sistema energético en su conjunto, y al tomar en cuenta no sólo los costos de la energía sino también los riesgos relacionados con la variabilidad de dichos costos, se observa que las energías renovables, gracias a sus riesgos pequeños o nulos, permiten en realidad, en muchos casos, reducir los costos totales del sistema.

Por tanto, resulta necesario tomar con seriedad los posibles escenarios y considerar que existen riesgos de restricciones en el abasto de energía en el mediano y largo plazo. Las energías renovables desempeñan un importante papel en aumentar la seguridad en el abasto de energía.

La teoría de Olduvai establece que la civilización industrial actual tendría una duración máxima de cien años, contados a partir de 1930. La teoría de Olduvai es un modelo que está fundamentado en la teoría del punto culminante del petrolero y el rendimiento energético per cápita del petróleo. Ante un previsible agotamiento establece que el ritmo de consumo energético y el crecimiento de la población mundial no puede ser el mismo que el acontecido durante el siglo XX. Como se representen la gráfica 1.2.¹¹



GRÁFICA 1.2 PRODUCCION DEL PETRÓLEO DESDE EL AÑO 1850 HASTA 2200. Fuente: Richard C. Duncan, PhD (2007). "The Olduvai Theory: Terminal Decline Imminent". La Teoría de Olduvai: TSCQ.

1.3 Tipos de energías renovables.

Son muchas las fuentes de energía que podemos aprovechar (ejemplo: el sol, el viento, etcétera), las energías renovables se caracterizan por ser abundantes son poco dañinas para el medio ambiente, pero las tecnologías para su aprovechamiento están actualmente en desarrollo.² Las energías limpias y renovables ayudan a frenar el cambio climático y consiguen un desarrollo armónico y equilibrado así como seguridad energética para el futuro.⁴

Dentro de este grupo podemos nombrar: biomasa, energía hidráulica, geotérmica, eólica, solar, etcétera. Y estas energías provienen del recurso renovable.

Los recursos renovables son aquellos que tienden a conservarse o reproducirse a través de un ciclo biológico, como: la flora, la fauna, etcétera.

1.3.1 Radiación solar (energía solar).

El sol es la fuente energética primaria. Es una estrella que emite luz y calor con un radio de unos 695,000 kilómetros.³

Debido a las altas temperaturas que se encuentran en el sol (6,000 °C) y a la intensa presión (340,000 veces mayor que la presión atmosférica de la tierra), se producen reacciones nucleares entre los átomos de hidrogeno, los protones del núcleo de hidrógeno se liberan fusionándose más tarde en grupo de cuatro, para formar partículas Alfa, que tienen menos masa que los cuatro neutrones restantes, por lo que el resto de la masa se transforman en energía por convección, que va desplazándose hacia la superficie del sol donde es liberada en una gran cantidad de luz y calor (figura 1.9), esta estrella continuará liberando energía durante unos 5,000 millones de años en los que seguirá suministrando energía a nuestro planeta a partir de la radiación. Sin sol no existiría la vida.⁴

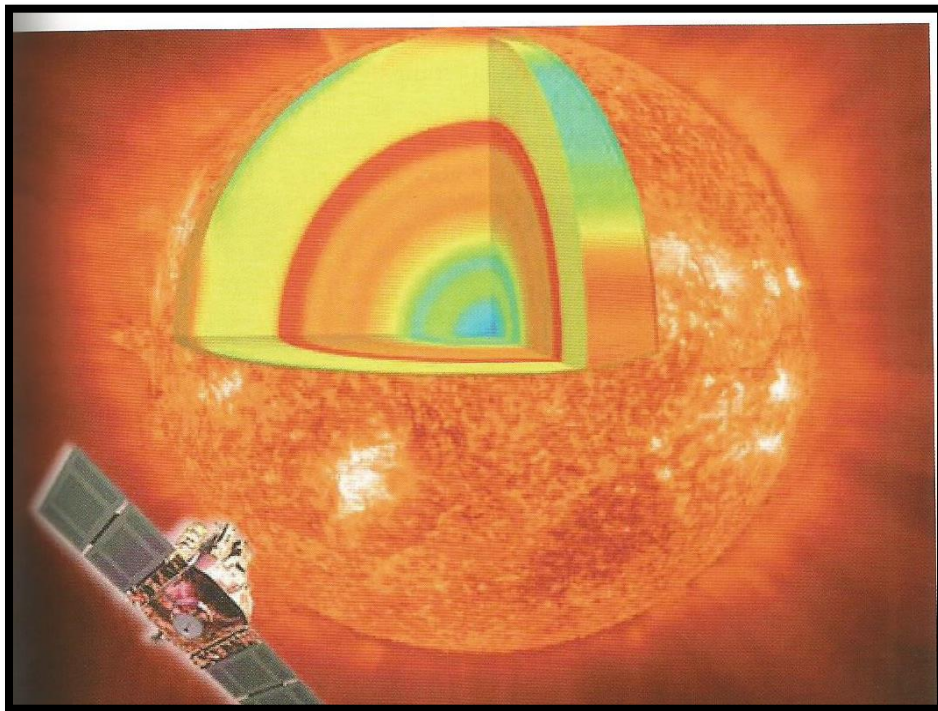


FIGURA 1.9 EL SOL. Fuente: Antonio Madrid, (2009). "Energías renovables (fundamentos, tecnologías y aplicaciones)". Editorial Mundi-Prensa. Capítulo 15, páginas 279 a la 284

La energía que emite el sol se puede utilizar de dos formas: la energía fototérmica y la fotovoltaica.

La energía solar térmica o también llamada energía fototérmica se utiliza en nuestro país principalmente para calentar agua, mientras que la energía fotovoltaica (energía solar que produce electricidad) se utiliza para proporcionar energía en regiones alejadas bombeando agua, iluminando casas, activando teléfonos y en alumbrado público, entre otros usos.²

Mediante las instalaciones adecuadas es posible conseguir captar la energía del sol de varias formas. Estas son las aplicaciones básicas que se han desarrollado en la actualidad para la energía emitida por el sol.

- Instalaciones solares térmicas: Con ellas se consigue captar el calor del sol y emplearlo para calefacción de casas y edificios, calentamiento de agua para necesidades industriales y necesidades domésticas tales como duchas, piscinas, lavabos, etc. Estas instalaciones son muy importantes porque entre el 75 y el 80% del consumo energético de una vivienda o edificio se utiliza en la calefacción y el calentamiento de agua, por lo cual genera un alto consumo energético.²
- Instalaciones solares fotovoltaicas: Con ellas se consigue captar luz del sol y convertirla directamente en electricidad, que se puede emplear en las mismas aplicaciones que se tiene hoy en día.¹
- Instalaciones solares termoeléctricas: Son una combinación de las dos instalaciones anteriores (Instalaciones solares térmicas e Instalaciones solares fotovoltaicas), ya que a partir de la energía recibida del sol, producen calor y electricidad.⁴

La energía solar fototérmica y fotovoltaica no producen ningún tipo de emisiones nocivas durante su funcionamiento.

1.3.2 Energía eólica.

La palabra “eólica” viene de Eolo, dios de la mitología griega que designaba el viento. El viento (masa en movimiento) posee una energía cinética que se aprovecha para transformarla en otro tipo de energía ya sea mecánica o eléctrica.⁹

La energía cinética de un cuerpo es aquella energía que posee debido a su movimiento y se define como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa determinada desde él su reposo hasta la velocidad indicada, por lo tanto, la energía eólica entonces la podemos definir como la energía que genera el viento.⁴

La energía eólica ha sido utilizada a lo largo de los siglos para moler el grano, bombear el agua y más recientemente en otras aplicaciones mecánicas como la generación de energía eléctrica a partir de aerogeneradores (generador eléctrico).²

Al ser la energía cinética la que se obtiene del viento se aplica la siguiente ecuación para poder calcular la cantidad de energía que se obtiene a partir de esta: ²

$$\dot{E} = \frac{E}{\Delta t} = \frac{1}{2}(\dot{m} * v^2) = \frac{1}{2}\rho A v^3 \dots\dots\dots (1.1)$$

Dónde:

E= energía en KJ (potencia)

m= masa en kilogramos

v= velocidad en metros por segundo

ρ= Densidad del viento

v= velocidad del viento

A= área barrida por las álabes

Es otra fuerte potencial con la que cuenta nuestro país, para aprovechar este tipo de energía existen centrales eólicas las cuales convierten la energía del viento en

energía eléctrica mediante una aeroturbina o generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento, que hace girar un generador, los aerogeneradores aprovechan la velocidad del viento comprendido entre 5 y 20 metros por segundo, con velocidades menores el equipo no funciona y con velocidades mayores debe pararse para no dañarlo.

En nuestro país tenemos la central eólica de La Venta, en la ciudad de Juchitán, Oaxaca. Fue la primera planta eólica en México y en el continente Americano con una capacidad instalada (cantidad máxima que pueden obtenerse del equipo) de 1.575 MW (mega watt) ⁴. Actualmente se encuentran en uso la de Guerrero Negro, Baja California Sur que se encuentran dentro de la Zona de Reserva de la Biosfera de El Vizcaíno y tiene una capacidad de 0.600 MW (mega watt) y cuentan con un solo aerogenerador.¹⁴ El potencial eólico del país no ha sido evaluada de manera exhaustiva. El desarrollo de la energía eólica en el corto y mediano plazo en México dependen del potencial físico del recurso, la capacidad industrial y la capacidad del sistema eléctrico para absorber la electricidad generada (figura 1.10).⁴



FIGURA
1.10 ENERGÍA EÓLICA (AEROGENERADORES). Fuente: 4. Antonio Madrid, (2009). “Energías renovables (fundamentos, tecnologías y aplicaciones)”. Editorial Mundi-Prensa. Capítulo 9, Páginas 144 a la 166.

1.3.3 Biomasa.

La biomasa la podemos definir como cualquier material de origen orgánico que almacena energía útil.

Las plantas verdes son auténticos colectores solares (energía) a partir de la fotosíntesis (figura 1.11) muy baratos con los cuales se cubren miles de kilómetros cuadrados a bajo costo.⁴

La energía colectada en las plantas verdes por la acción fotosintética puede ser aplicada para la producción de combustibles “verdes”, para el transporte (etanol, metanol, biodiesel) y/ o para plantas de generación eléctrica.



FIGURA 1.11 PLANTAS COLECTORAS DE SOL. Fuente: Antonio Madrid, (2009). “Energías renovables (fundamentos, tecnologías y aplicaciones)”. Editorial Mundi-Prensa. Capítulo 10, Páginas 167 a la 191.

El potencial de la bioenergía en México va mucho más allá del limitado aprovechamiento que se hace de ella en la actualidad.

Este potencial se divide en combustibles de madera (provenientes de bosques naturales, plantaciones, subproductos de la extracción forestal y la industria maderera), agro combustibles y biogás de rellenos sanitarios.²

La biomasa puede liberar energía de dos formas:

1. Combustión directa: esta ocurre cuando quemamos madera, hojas y ramas secas que liberan calor. La combustión directa se aplica a la biomasa de bajo contenido en humedad.¹
2. Combustión indirecta: mediante la acción de levaduras, sus azúcares se transforman en alcohol, que a su vez se puede usar como fuente energética. La forma indirecta se aplica a biomásas con gran contenido en humedad.¹

Las biomásas tales como la madera de los árboles, las hojas secas, el mosto de la uva, la caña de azúcar, etcétera, estas son renovables debido a su ciclo de producción que es relativamente corto (Figura 1.12).⁴



FIGURA 1.12 BIOMASA. Fuente: Antonio Madrid, (2009). "Energías renovables (fundamentos, tecnologías y aplicaciones)". Editorial Mundi-Prensa. Capítulo 10, Páginas 167 a la 191.

En México, se emplean los residuos vegetales para producir calor mediante la combustión de los mismos, en las comunidades rurales para cocinar, calentar agua para el baño, etcétera. En el sector industrial se utiliza el bagazo de caña en los ingenios de azúcar para aportar energía para proceso de refinado.²

1.3.4 Energía geotérmica.

La energía geotérmica, es la energía calorífica propia de la Tierra como se muestra en la figura 1.8.¹Esta se manifiesta con fenómenos térmicos interiores, como son las erupciones volcánicas, geisers, lagunas calientes, volcanes de lodo o manantiales de aguas termales. A la energía contenida en el agua que se ha concentrado en ciertos sitios del subsuelo, se le conoce como yacimientos geotérmicos.

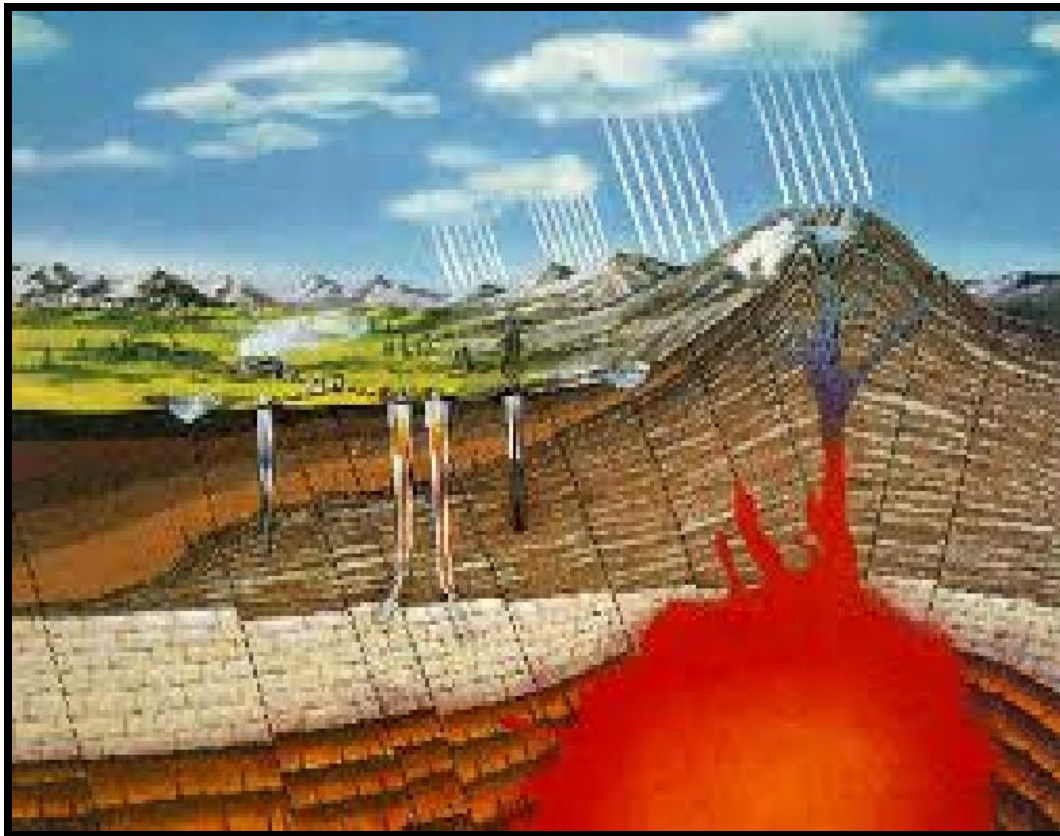


FIGURA 1.13 ENERGÍA GEOTÉRMICA. Fuente: Gregorio Gil García, (2008). "Energías del siglo XXI, de las energías fósiles a las alternativas". Ediciones Mundi-Prensa. Capítulo 11, Páginas 385 a la 415.

La energía geotérmica la podemos aprovechar básicamente, como se muestra en la figura 1.14: ¹

- Yacimientos geotérmicos. El agua de lluvia se filtra por el suelo y puede llegar a formar depósitos subterráneos, que al estar en contacto con rocas calientes alcanzan una temperatura de hasta 370 °C por lo cual si se llega a estos depósitos, tendríamos una fuente de calor.¹
- Gradiente térmico del interior de la tierra. La temperatura de la tierra va aumentando desde la superficie hasta su centro, este gradiente térmico se puede aprovechar para calentar agua, producir electricidad, climatizar viviendas, etcétera.¹

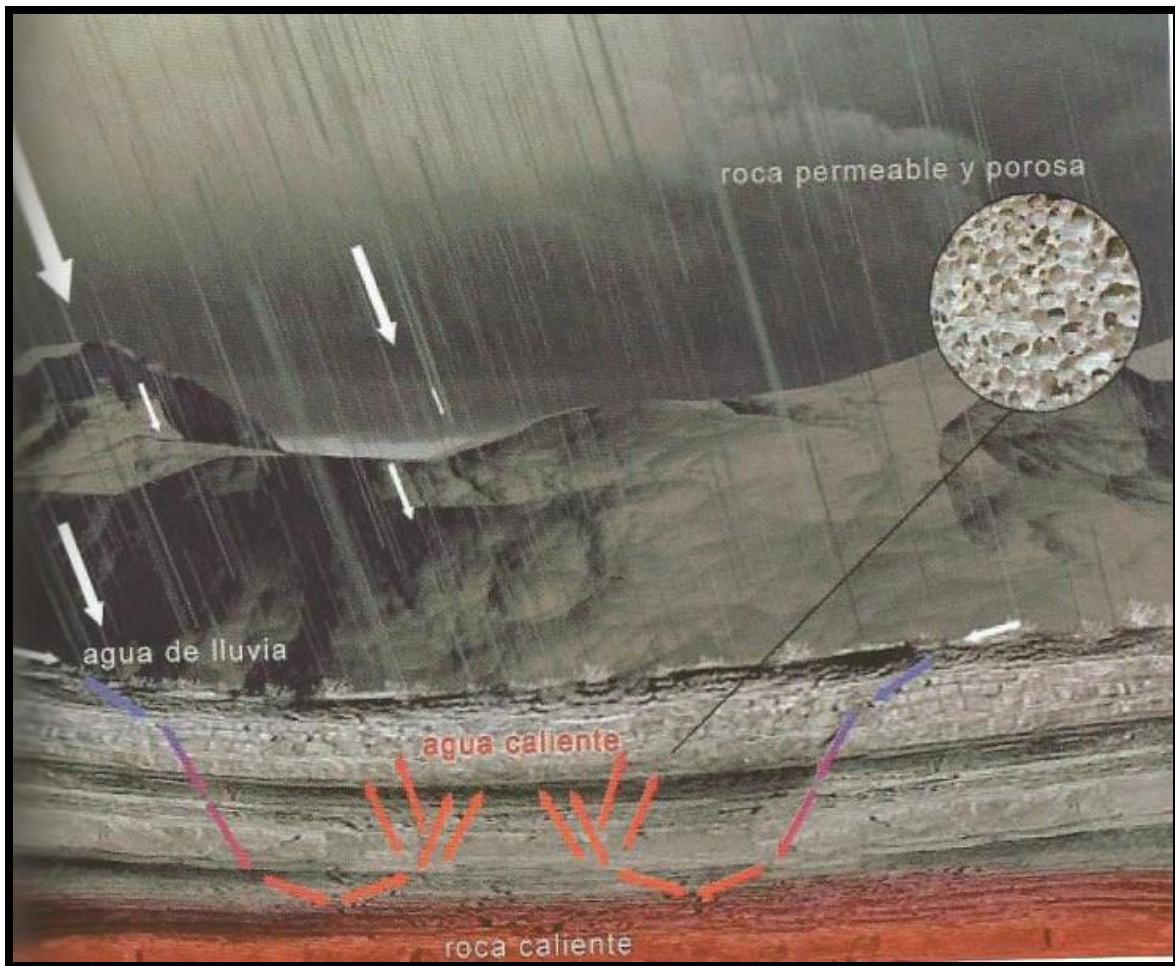


FIGURA 1.14 TIPOS DE ENERGÍA GEOTÉRMICA. Fuente: Gregorio Gil García, (2008). "Energías del siglo XXI, de las energías fósiles a las alternativas". Ediciones Mundi-Prensa. Capítulo 11, Páginas 385 a la 415.

La energía calorífica proveniente del núcleo de la tierra, se desplaza hacia arriba en el magma que fluye a través de las fisuras existentes en las rocas sólidas y semisólidas del interior de la tierra alcanzando niveles cercanos a la superficie, donde mantiene y se transmite a los mantos acuíferos del subsuelo. Por medio de pozos específicamente perforados, estas aguas subterráneas, que poseen una gran cantidad de energía térmica almacenada, se extraen a la superficie transformándose en vapor que se utiliza para la generación de energía eléctrica.

Las plantas geotermoeléctricas utilizan el vapor natural que se extrae de los yacimientos, para alimentar a las turbinas de vapor que mueven a los generadores eléctricos. Esta tecnología se basa en principios análogos a los de una termoeléctrica convencional.

En 1959 se instaló la primera planta experimental geotérmica en nuestro país y está ubicada en Pathé, en el estado de Hidalgo. El mayor desarrollo geotérmico de México, se encuentra en el campo de Cerro Prieto, localizado a unos 30 Km al sur de Mexicali, Baja California Norte; con una capacidad total de 720 MW (mega watt) distribuidos en: cuatro unidades de 110 MW cada una, cinco de 36 MW y cuatro de 25 MW.¹⁴

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha desarrollado competencia tecnológica para explorar, perforar pozos, diseñar, construir y operar plantas geotermoeléctricas en México por ser esta una de las energías "limpias" con las que cuenta el país.¹⁴

1.3.5 Energía hidráulica.

La energía hidráulica es aquella energía que se obtiene de la energía cinética y potencial (energía que mide la capacidad que tiene un sistema para realizar un trabajo en función exclusivamente de su posición, energía que se encuentra "almacenada") que produce el movimiento del agua. Por medio de

turbinas y presas hidroeléctricas es posible transformar las energías cinética y potencial del agua en energía eléctrica.⁴

Una central hidroeléctrica, es aquella que aprovecha la energía potencial de cualquier masa de agua a cierta altura, para convertirla primero en energía mecánica y posteriormente en eléctrica. Un sistema de captación de agua provoca un desnivel que origina cierta energía potencial acumulada. El paso del agua por la turbina desarrolla en la misma un movimiento giratorio que acciona el generador eléctrico. Las centrales hidroeléctricas se caracterizan porque no son contaminantes y pueden suministrar trabajo sin producir residuos (rendimiento 80%).¹

Toda central hidroeléctrica transforma la energía potencial del agua acumulada en el embalse (energía eléctrica a través del alternador). Las diferentes transformaciones de energía que se producen se muestra en la figura 1.15:⁴

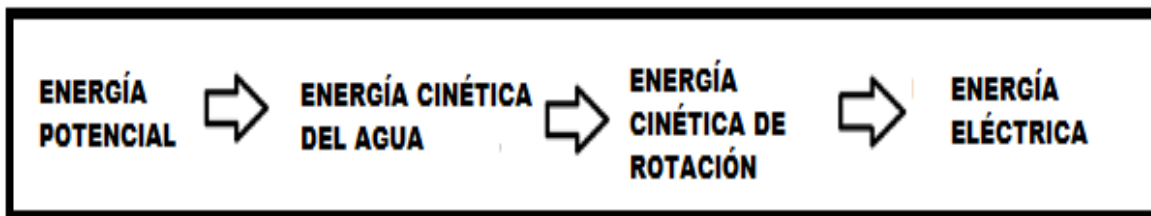


FIGURA 1.15 Transformación de la energía. Fuente: Antonio Madrid, (2009). “Energías renovables (fundamentos, tecnologías y aplicaciones)”. Editorial Mundi-Prensa. Capítulo 8, Páginas 134 a la 143.

El principio del funcionamiento de las plantas hidroeléctricas es a partir de una presa que sirve para contener el agua y formar tras de sí un embalse. El agua se libera por los desagües, que fluye por las tuberías de conexión hasta la sala de máquinas (una vez filtrada); la energía cinética (energía que posee un cuerpo debido a su movimiento) del agua acumulada se convierte en energía cinética de rotación de la turbina, que acoplada a un alternador de forma solidaria, genera energía eléctrica como se muestra en la figura 1.16.¹⁵

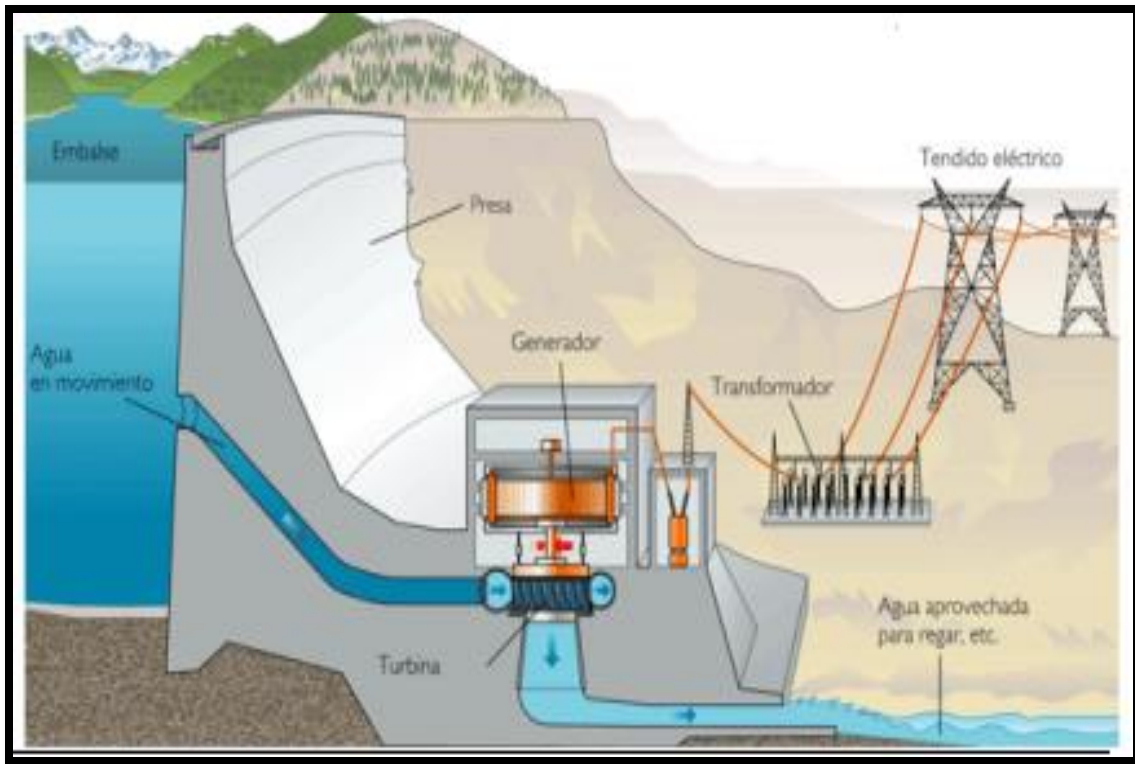


FIGURA 1.16 ENERGÍA HIDRÁULICA. Fuente: Diagrama de una planta hidroeléctrica. Adaptado de: Comisión Federal de Electricidad. “Del fuego a la energía nuclear.” México (2010).

1.3.6 Energía Nucleoeléctrica.

La energía nuclear es producida por la energía liberada durante la fisión del átomo, es limpia, confiable, no contaminante, pero con una desventaja produce residuos que tardan muchos años en perder su actividad. Para poder transformar la energía nuclear en energía eléctrica es necesario contar con centrales nucleares.⁴

Una central de este tipo utiliza combustible “nuclear”, esto es, material que contiene núcleos fisionables (es decir que se pueden ‘partir’) como el uranio, en lugar del combustible “convencional”.⁴

El Uranio 235 es un material fisionable, como el Plutonio, pero del Uranio natural que se extrae de las canteras, sólo 1 de 140 partes extraídas es Uranio 235, el resto es inutilizable. Un reactor puede funcionar con uranio natural (escaso material fisionable) como con uranio enriquecido, el cual se ha tratado

especialmente para aumentar su rendimiento de fisión (se aumenta a una mayor proporción de U.235).¹

El calor para generar vapor proviene del proceso de fisión realizada en una planta nuclear. La fisión comienza cuando un neutrón a gran velocidad choca contra un núcleo, el núcleo no puede albergar el neutrón extra y se parte formando dos núcleos más pequeños. Al mismo tiempo se liberan varios neutrones que van a chocar contra otros núcleos, que a su vez se rompen y liberan más neutrones, y así sucesivamente. Dado que el primer neutrón desencadena una serie de fisiones, este procedimiento se denomina reacción en cadena. Así, se puede generar una enorme cantidad de energía y de calor en una fracción de segundo. Este proceso se lleva a cabo en el núcleo del reactor, formado por los elementos combustibles como se muestra en la figura 1.17.⁴

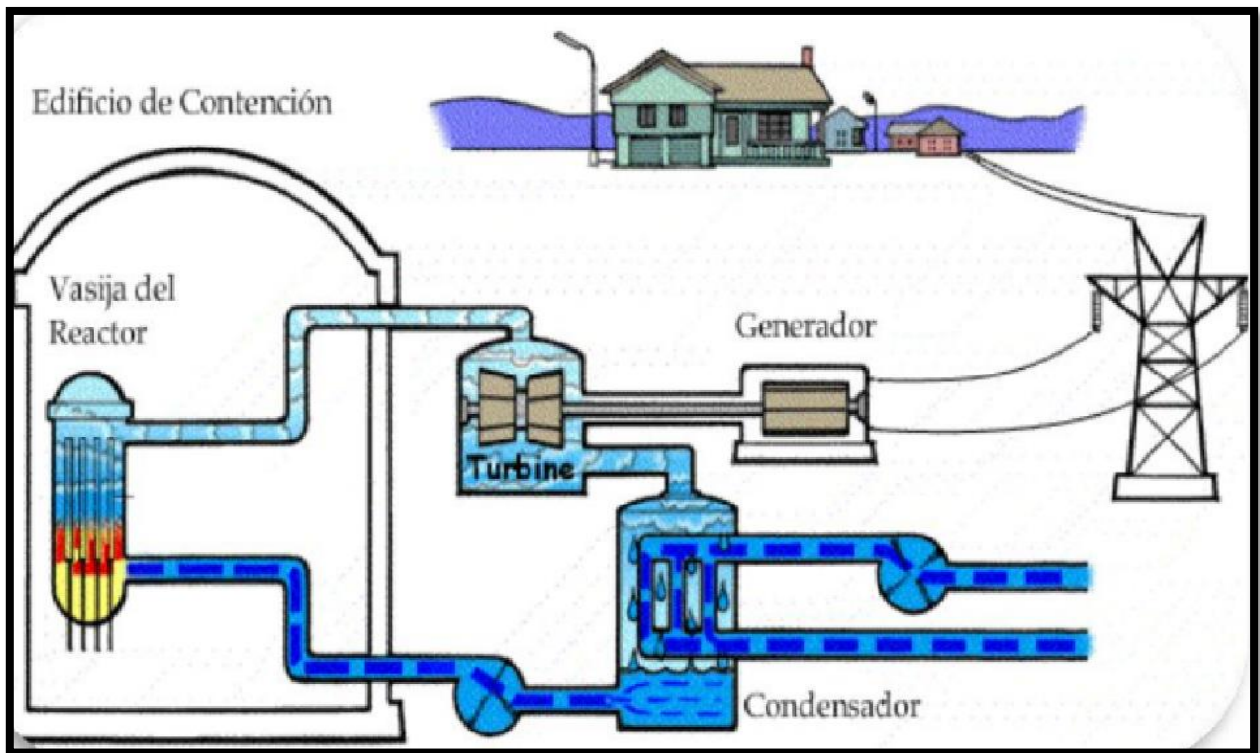


FIGURA 1.17 ENERGÍA NUCLEOELECTRICA. Fuente: " Comisión Federal de Electricidad. CFE. "Del fuego a la energía nuclear. México (2010).

En estas centrales, la energía extraída del combustible por la reacción nuclear se emplea para producir vapor a alta temperatura y presión, y así poder producir energía eléctrica.

1.3.7 Energía Oceanomotriz.

La energía oceanomotriz es una fuente inagotable de energía cinética, los océanos pueden suministrarnos energía por medio de los cinco flujos de interés para generar electricidad: ⁴²

1. Mareas
2. corrientes marinas
3. oscilaciones del nivel del mar
4. gradientes de temperaturas y
5. gradientes salinos.

La energía de mareas (figura 1.18) puede aprovecharse debido a una diferencia de alturas del nivel del mar (similar al funcionamiento de una hidroeléctrica) y las corrientes generadas por el movimiento de los océanos también son una reserva de energía a la espera de una razonable explotación. ¹

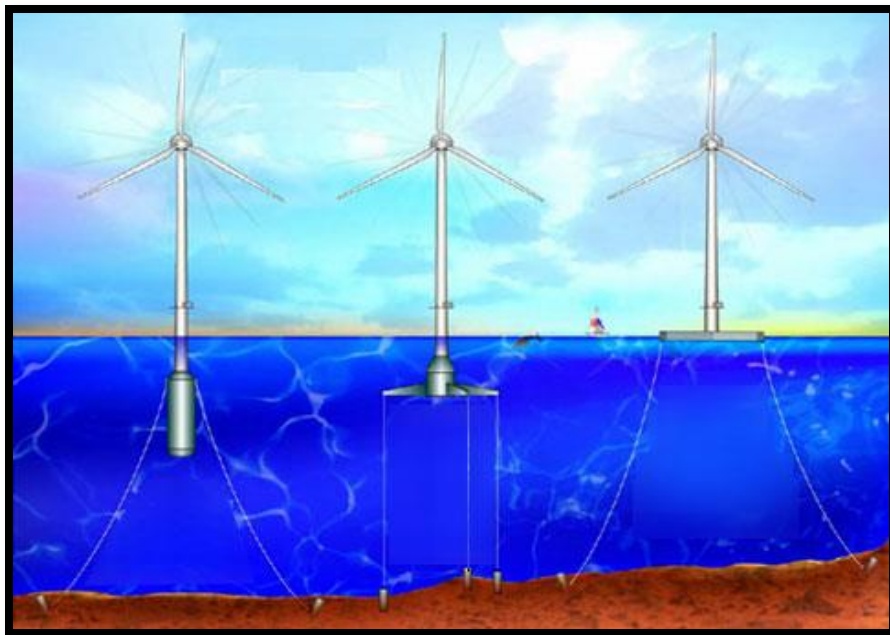


FIGURA 1.18 ENERGÍA OCEANOMOTRIZ. Fuente: Gregorio Gil García, (2008). "Energías del siglo XXI, de las energías fósiles a las alternativas". Ediciones Mundi-Prensa. Capítulo 12, Páginas 419 a la 449.

En el ascenso y descenso de las mareas, las centrales oceanomotrices utilizan estas diferencias en los niveles de agua y explotan también las corrientes de agua que se logran en ambas direcciones en los tiempos en que las mareas cumplen su ciclo (ecuación 1.2). La diferencia de altura (Δh) la cual da lugar al cambio de la energía potencial.⁴²

$$\Delta E_p = \rho g \Delta h \dots \dots \dots (1.2)$$

Donde (g) y (ρ) son la aceleración de la gravedad y la densidad del agua respectivamente, ΔE_p es el cambio de energía potencial. La velocidad (u) del flujo y el área perpendicular del mismo (A) de las corrientes de agua da lugar a la potencia hidrodinámica P (ecuación 1.3).⁴²

$$P = \frac{1}{2} \rho A u^3 \dots \dots \dots (1.3)$$

Las centrales de energía de este tipo captan y convierten ambos fenómenos en electricidad.

Los gradientes de altura y la velocidad de flujo de las mareas son provocados por la fuerza gravitacional de la luna y el sol. En función de la carrera de marea (diferencia en el plano vertical entre la bajamar y pleamar o también conocido con el nivel más alto que alcanza el mar durante la marea alta), existen en el planeta diversos lugares ya localizados para construir centrales oceanomotrices.⁴²

También hay otro tipo de corrientes aunque de naturaleza diferente a las provocadas por las mareas y se les conoce como corrientes oceánicas y son de escala planetaria. Estas corrientes recorren tanto en la superficie del mar como en sus profundidades y son generados por la convección del agua debido a la radiación solar (gradientes de temperatura) y los gradientes salinos. En virtud que las variaciones térmicas de largo periodo de estas corrientes están siendo utilizadas para estimar el cambio climático del planeta, actualmente se encuentran sujetas a muy diversas investigaciones.⁴²

La más célebre y antigua central oceanomotriz se encuentra en el estuario de Rance, Francia, con una capacidad de 240 MW y opera desde hace más de 40 años. En México se tiene localizada una región promisoría en el alto Golfo de

California, cuyo potencial energético ha sido evaluado en 26 GW y una potencial producción de 23,000 GWh/año, que es similar a la producción de electricidad de todas las hidroeléctricas del país, sin embargo, el reto ambiental es muy importante por la riqueza natural que existe en esta zona.⁴²

El potencial energético de las corrientes, tanto las mareas como las oceánicas, es elevado, diversos sistemas de ingeniería se han puesto a prueba para su explotación, por ejemplo los propuestos por *Marine Currents Turbines*, entre otras empresas dedicadas al diseño y construcción de turbinas marinas. En México se tienen estudios sobre la corriente del canal de Yucatán, Baja California y el Pacífico realizado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en 2005.⁴²

1.3.7.1 Energías provenientes de las olas

El oleaje (figura 1.19) resulta de la acción del viento sobre la superficie del agua y, pese a su familiar imagen, es de una extraordinaria complejidad. En el caso de México, la energía concentrada promedio en una ola se encuentra entre los 20-30 kW/m. El desafío técnico de transformar esta inmensa energía disponible en electricidad ha tenido una respuesta positiva, como puede constatarse en las decenas de dispositivos concebidos y construidos.⁴²



FIGURA 1.19 Oleaje. Fuente: “La Secretaría de Protección Civil” (6 de septiembre de 2011) Xalapa, Ver.

1.3.7.2 Bufadora

El oleaje en las costas también causa uno de los efectos más atractivos del mar conocidos como “geiseres” o “bufadoras”.

Se presentan cuando el oleaje se propaga sobre cavernas submarinas fracturadas natural o artificialmente, siendo sus canales los distribuidores de chorros de aire y agua que salen disparados varios metros sobre el nivel del mar.⁴²

La bufadora es una pequeña muestra del poder de las olas como se muestra en la figura 1.20. En el transcurso de la historia humana, ese poder se ha manifestado de manera destructiva, ya sea en forma de tsunamis, huracanes y/o tormentas. Estas adversidades han obligado a que la ingeniería de la protección portuaria haya nacido hace miles de años levantando una de las más importantes infraestructuras de protección y símbolo de nuestra civilización: los rompeolas.⁴²



FIGURA 1.20 BUFADORA. Fuente: “La Secretaría de Protección Civil” (6 de septiembre de 2011) Xalapa, Ver.

La bufadora ha inspirado el diseño de un dispositivo que la reproduce (ver figura 1.21) y que se encuentra en proceso de desarrollo para generar electricidad y almacenarla en forma de hidrógeno: el blowjet (conducto cerrado en el que, al estar totalmente confinadas, las olas se convierten en un flujo que va aumentando su velocidad en el interior del dispositivo).⁴²

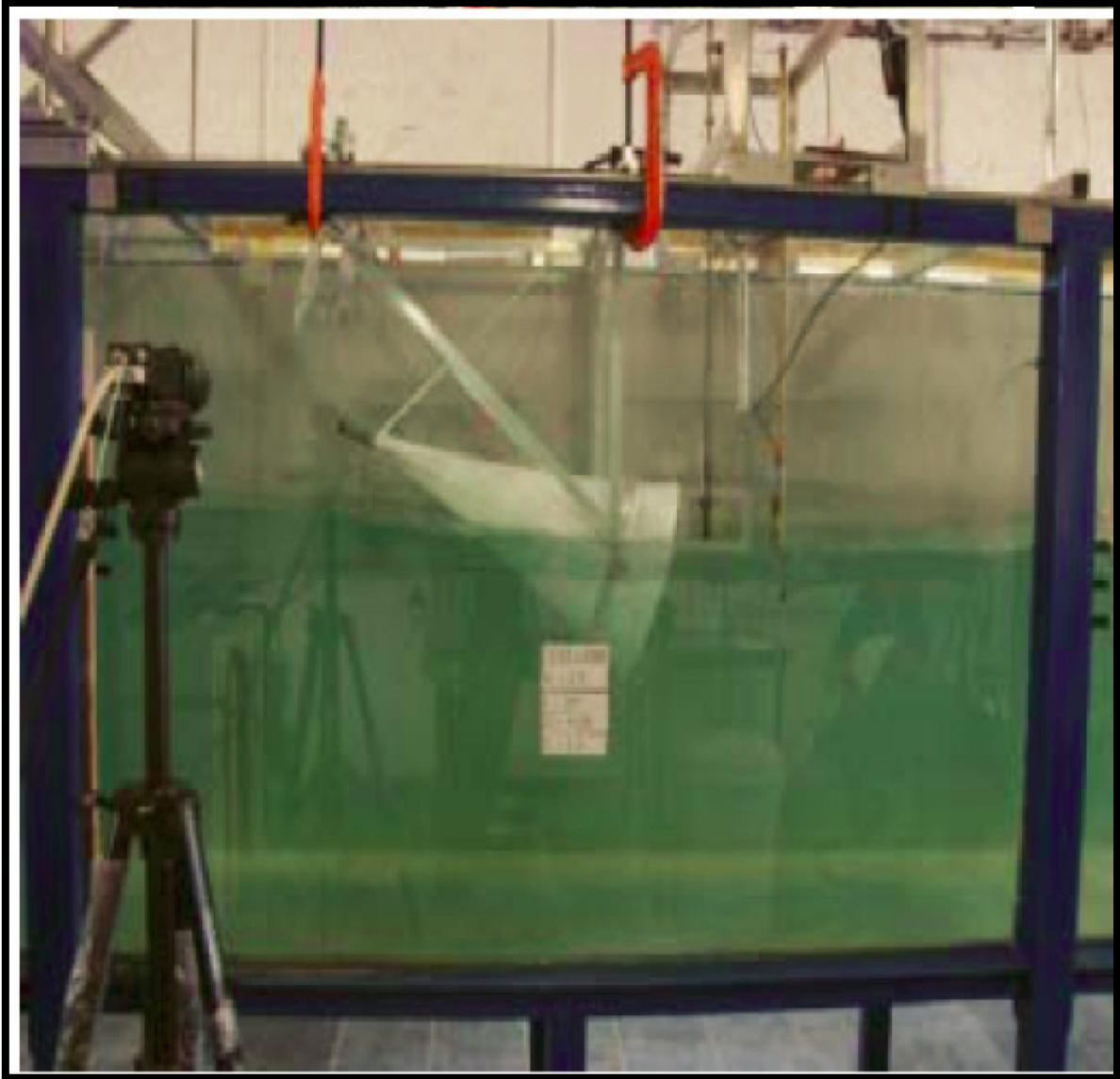


FIGURA 1.21 SIMULACIÓN DE UNA BUFADORA. Fuente: Rafael Sánchez Dirzo, Rodolfo Silva-Casarín, Edgar G. Mendoza-Baldwin y Rosa de Guadalupe González-Huerta. "Hidrógeno del Mar". Facultad de Estudios Superiores Zaragoza Campus II UNAM. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, Volumen 15, No 1, 2012. Páginas 49 a 61.

La bufadora más espectacular en México se halla en Ensenada, Baja California y es otra fuente de energía "limpia" con la que cuenta México.

**CAPITULO 2 DILEMA DE
LA ENERGÍA:
ALTERNATIVAS DE
SOLUCIÓN.**

Capítulo 2 Dilema de la energía: alternativas de solución.

2.1 Sistema energético Mexicano.

El consumo de energía en México ha tenido mayor demanda por el crecimiento de las actividades económicas (proceso de adquisición de bienes y/ o servicio), la producción nacional, la industria petrolera y eléctrica, así como el uso de nuevas tecnologías haciendo más eficiente las actividades a realizar. El uso intermedio y constante de la energía también ha provocado que la cantidad de emisiones contaminantes se incremente generando perspectivas nada alentadoras para los siguientes años, de mantenerse la tendencia actual. En consecuencia existe actualmente un debate acerca de cómo lograr disminuir el consumo de energía sin afectar las actividades económicas y contribuyendo a disminuir las emisiones de gases a la atmósfera.²¹

El modelo energético de México, es del tipo energético-ambiental, desarrollado en el IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas) en colaboración con especialistas del INE (Instituto Nacional de Ecología) y la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México).

El modelo está estructurado en la plataforma LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System) desarrollado en el Instituto del Medioambiente de Estocolmo Suecia y se establece en el año de 1989.⁴³

En este modelo se representa el sistema energético mexicano (figura 2.1), desde las reservas energéticas existentes hasta la demanda de energéticos de uso final, tomando en cuenta la infraestructura de transformación y el desarrollo económico y demográfico del país.²²

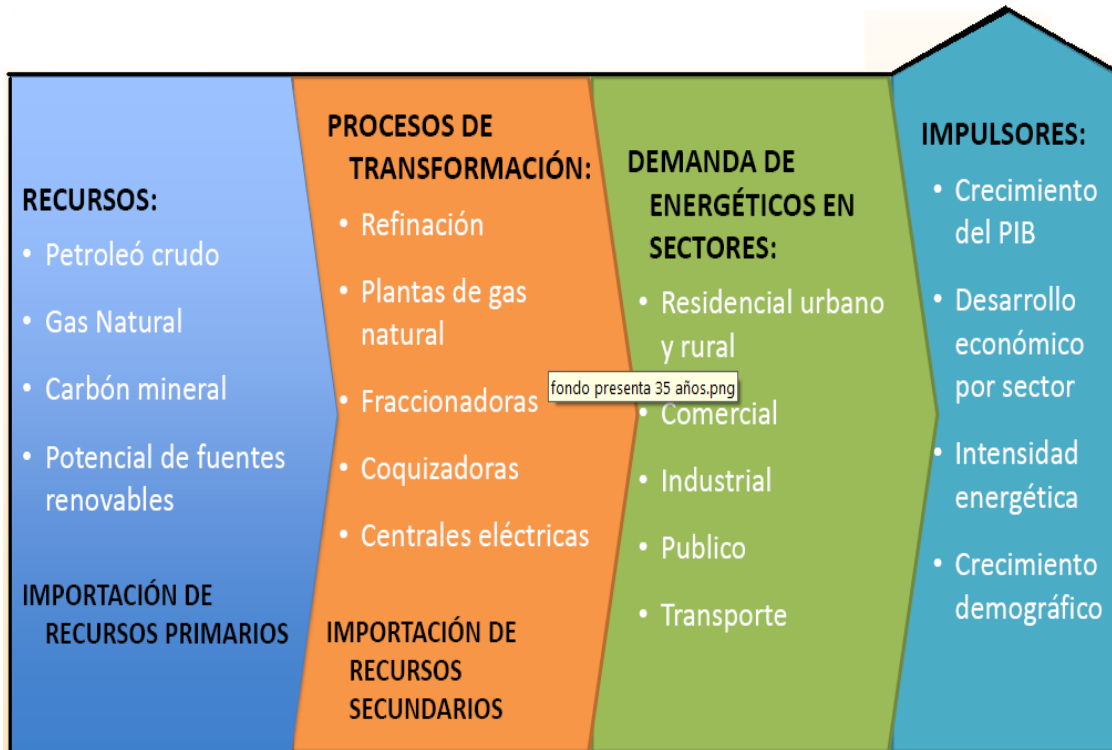


FIGURA 2. 1 Sistema energético mexicano. Fuente: Juan Mata Sandoval, “Las energías renovables en la política de desarrollo energético sustentable”, (7 de junio 2002). Subsecretaría de Política Energética y Desarrollo Tecnológico. Guanajuato, México.

2.2 Demanda energética, más consumo y menos emisiones.

La teoría de Olduvai es un modelo que principalmente está fundamentado en la teoría del cenit petrolero y el rendimiento energético per cápita del petróleo, esta teoría establece que la civilización industrial actual tendría una duración máxima de cien años, contados a partir de 1930.¹⁹

La teoría de Olduvai se define por la subida y caída de la calidad de vida material (CVM) descrita en la ecuación 2.1, que consiste en la tasa resultante del aumento o disminución de la producción, uso y consumo de las fuentes energéticas (E) entre el crecimiento de la población mundial (P).¹⁹

$$(CVM = E/P) \dots \dots \dots (2.1)$$

En la siguiente figura 2.2 se presenta el consumo de energía per cápita expresada en kilogramos de petróleo equivalente (kgoe) por persona en el año 2013 por país.²³

En dicha figura muestra: en color blanco se representan los países del cual no se recogieron datos, en colores claros los países con menor consumo, en colores fuertes los países con mayor consumo; los representados con rojo son los que han mostrado aumento de consumo y los de color rosa fuerte son los que han mostrado disminución en su consumo.²⁰

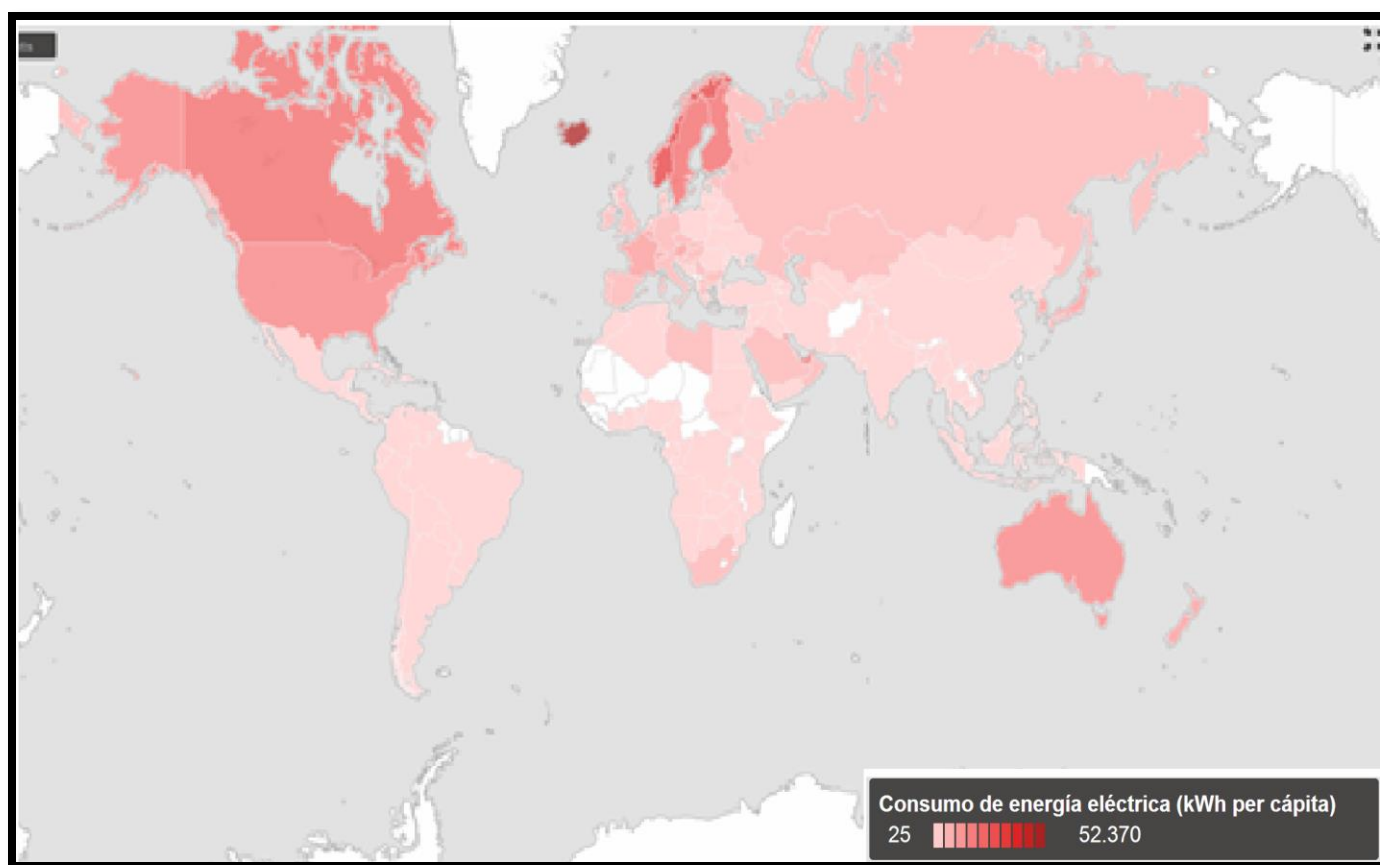


FIGURA 2. 2 Energía per cápita mundial. Fuente: International Energy Agency (IEA) Statistics Division (2013), Data Tables, World Resources Institute, Earth Trends.

Este mapa muestra la proporción de consumo de la energía per cápita por cada país. Fue analizado por el creador de la teoría de Olduvai, Richard C. Duncan y sostiene que a mayor inmigración mayor número de población por lo tanto mayor consumo energético e insinúa que la solución es el cierre de fronteras.¹²

2.2.1 Consumo de energía de la población.

Así como el cambio del carbón al petróleo como fuente primaria de energía, los Estados Unidos de Norteamérica va marcando los cambios mundiales, es el indicador de nivel del consumo y producción de energía per cápita a lo largo del tiempo, también va marcando el del resto del mundo¹⁴. Así, se distinguen tres etapas en el consumo de energía comparando el de Estados Unidos con el del mundo:

1. Crecimiento.¹⁹
2. Estancamiento.¹⁹
3. Decadencia.¹⁹

2.2.2 Crecimiento.¹⁹

- Etapa de crecimiento estadounidense de 1945 a 1970, se observa un crecimiento medio del 1,4% anual de producción de energía per cápita durante el periodo.
- Etapa de crecimiento mundial de 1954 a 1979, se observa un crecimiento medio del 2,8% anual de producción de energía per cápita durante el periodo.

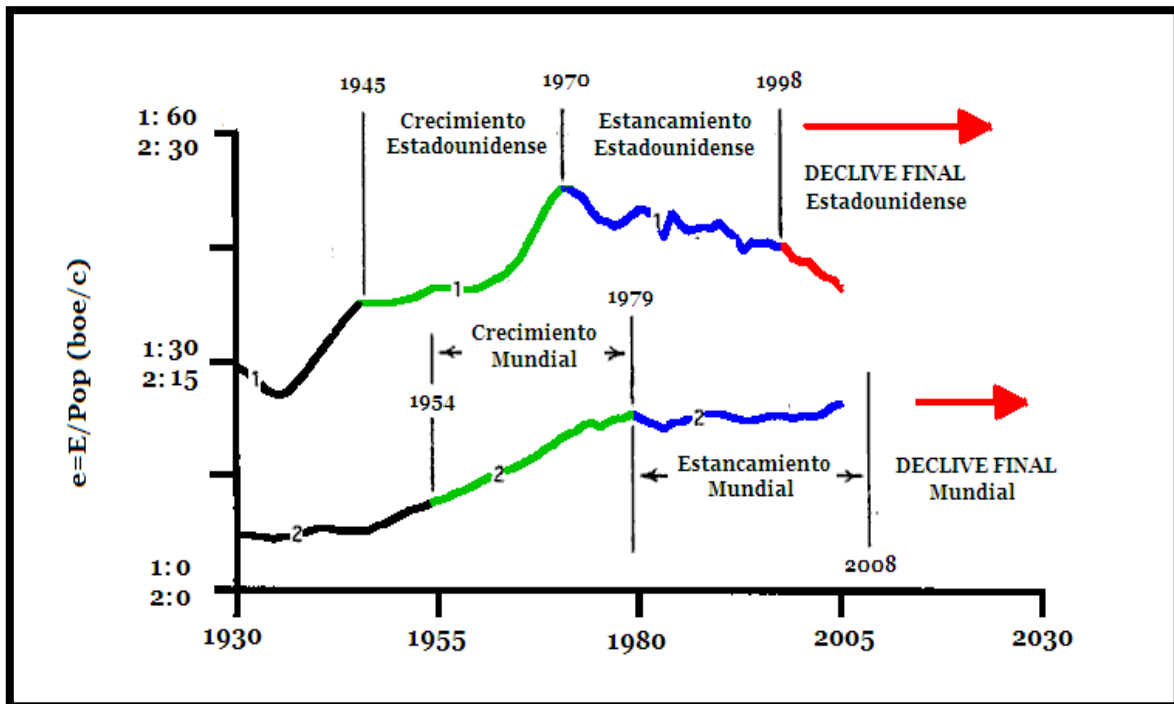
2.2.3 Estancamiento.¹⁹

- Etapa de estancamiento estadounidense de 1970 a 1998, se observa una disminución media del 0,6% anual de producción de energía per cápita durante el periodo.
- Etapa de estancamiento mundial de 1979 a 2008, se observa un crecimiento medio del 0,2% anual de producción de energía per cápita

durante el periodo, después del año 2000 se observa un repunte achacado al crecimiento de las economías emergentes.

2.2.4 Declive final o decadencia.¹⁹

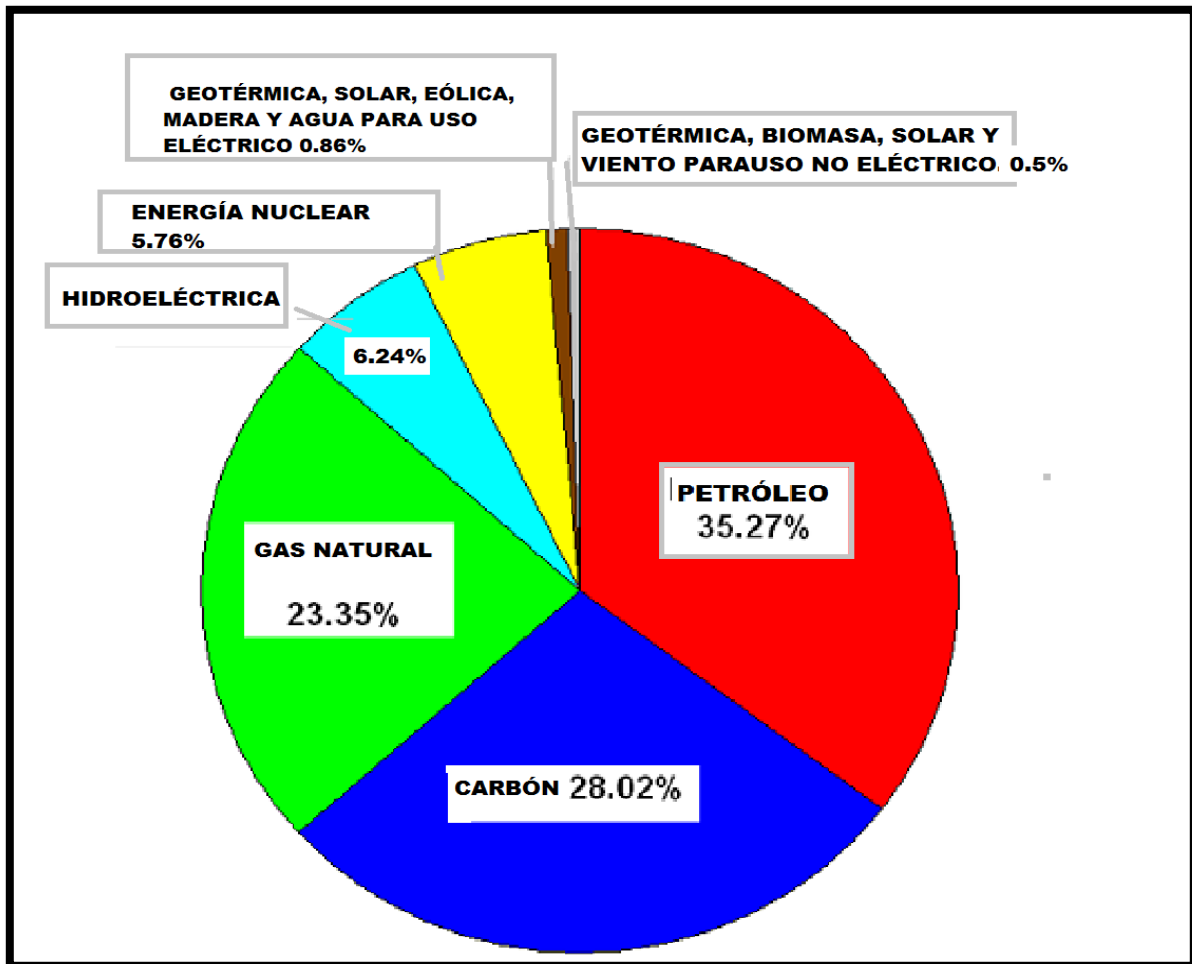
- Etapa de declive final estadounidense 1998 en adelante, se observa una disminución media del 1,8% anual de producción de energía per cápita durante el periodo 1998-2005
- Etapa probable del declive final mundial de 2008-2012 en adelante. El desarrollo de economías emergentes y la enorme utilización de carbón en China pueden hacer más lento este proceso hasta el 2012. Como se muestra en la gráfica 2.1.¹⁹



GRÁFICA 2. 1 GRÁFICA DEL NIVEL DE CONSUMO DE ENERGÍA DE 1930 A 2005. Fuente: Richard C. Duncan (2007) "The Olduvai Theory: Terminal Decline Imminent".

Al cumplirse las 3 etapas del consumo de energía será necesario tener otra fuente de materia prima para poder generarla.

En la actualidad el petróleo todavía representaba el 35,27% como fuente de consumo, mientras que el carbón aún representaba el 28,02%, en la siguiente figura se muestra el consumo de energía en el año 2006 según la página de la EDRO (Optimum Energy Communities) grafica 2.2.²⁰



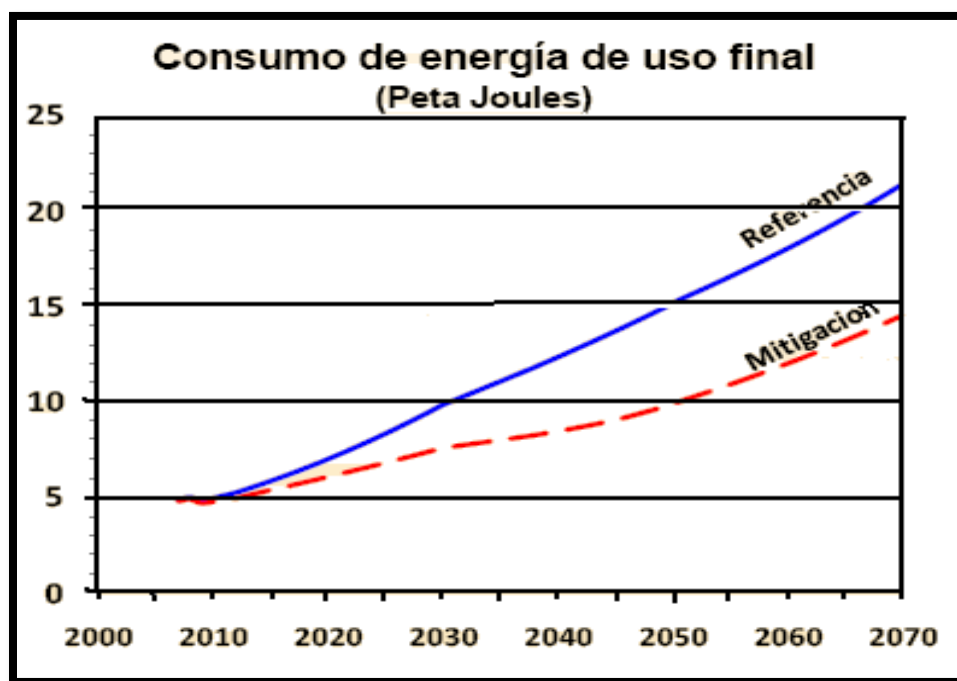
GRÁFICA 2. 2 ESQUEMA DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN EL AÑO 2010 SEGÚN EDRO. Fuente: "EDRO Seeding Socioeconomic Avalanches". «Optimum-Energy Communities» (en inglés). Consultado el 9 de febrero de 2014.

2.2.5 Panorama en México.

Los niveles actuales del consumo de energía en México (grafica 2.3) están asociados, principalmente, a la trayectoria del producto que es inconsistente con un desarrollo económico sustentable. Los requerimientos energéticos de la

economía mexicana por unidad de producto son elevados⁴³, de tal modo que una recuperación sostenida del ritmo de crecimiento económico se vería reflejada por una creciente demanda de energía con consecuencias negativas para el ambiente. Desde el punto de vista ambiental destacan dos efectos dañinos en los niveles actuales de consumo energético:

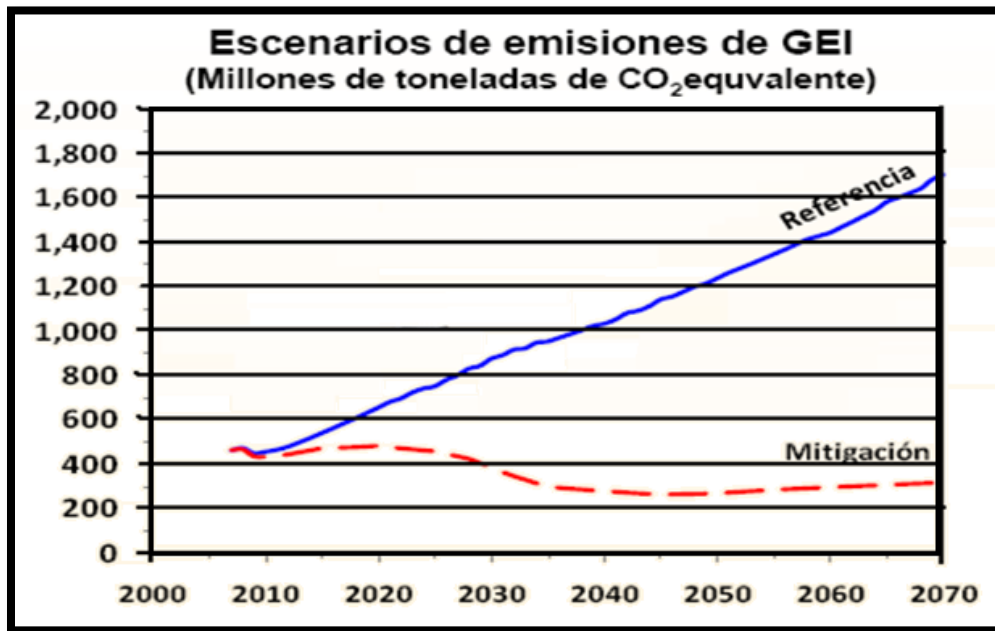
1. la oferta actual de energía en México se basa, en su mayoría, en el uso de recursos no renovables, como el petróleo y por tanto las condiciones de su consumo actual son inconsistentes con las definiciones de sustentabilidad débil y fuerte.⁴³
2. las emisiones a la atmósfera asociadas al consumo de energía tienen consecuencias negativas, tales como contaminación atmosférica y emisión de gases de efecto invernadero, asociados al cambio climático.⁴³



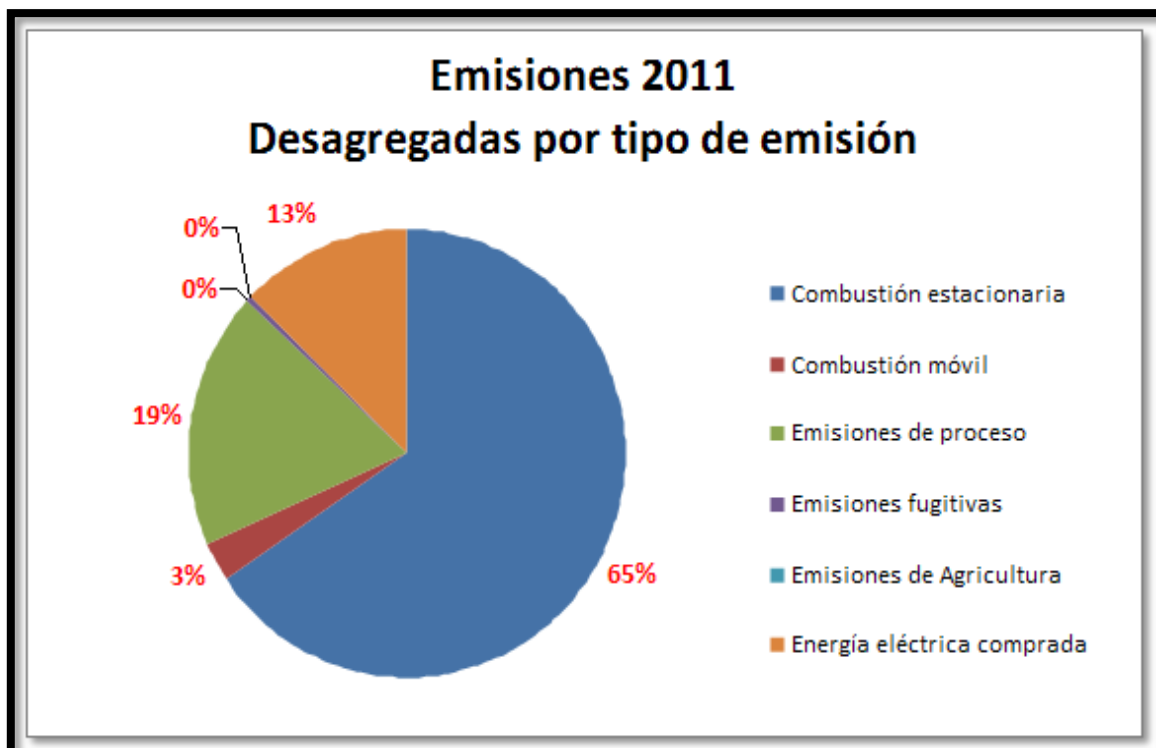
GRÁFICA 2.3 Consumo de energía de uso final. Fuente: Aguayo F. y K. P. Gallagher, (2005). "Economic reform, energy, and development: the case of Mexican manufacturing", vol.33, number 7, 2005, pp. 829-837.

En México el 65% de las emisiones reportadas provienen de fuentes de emisión estacionara, el 19% son emisiones de proceso, el 13% emisiones indirectas de energía eléctrica comprada, el 3% de combustión móvil, y en menor cantidad se

reportan emisiones fugitivas y del sector agrícola como se representan en las gráficas 2.4 y 2.5.²⁰



GRÁFICA 2. 4 Escenario de emisiones. Fuente: Aguayo F. y K. P. Gallagher, (2005). "Economic reform, energy, and development: the case of Mexican manufacturing", vol.33, number 7, 2005, pp. 829-837.

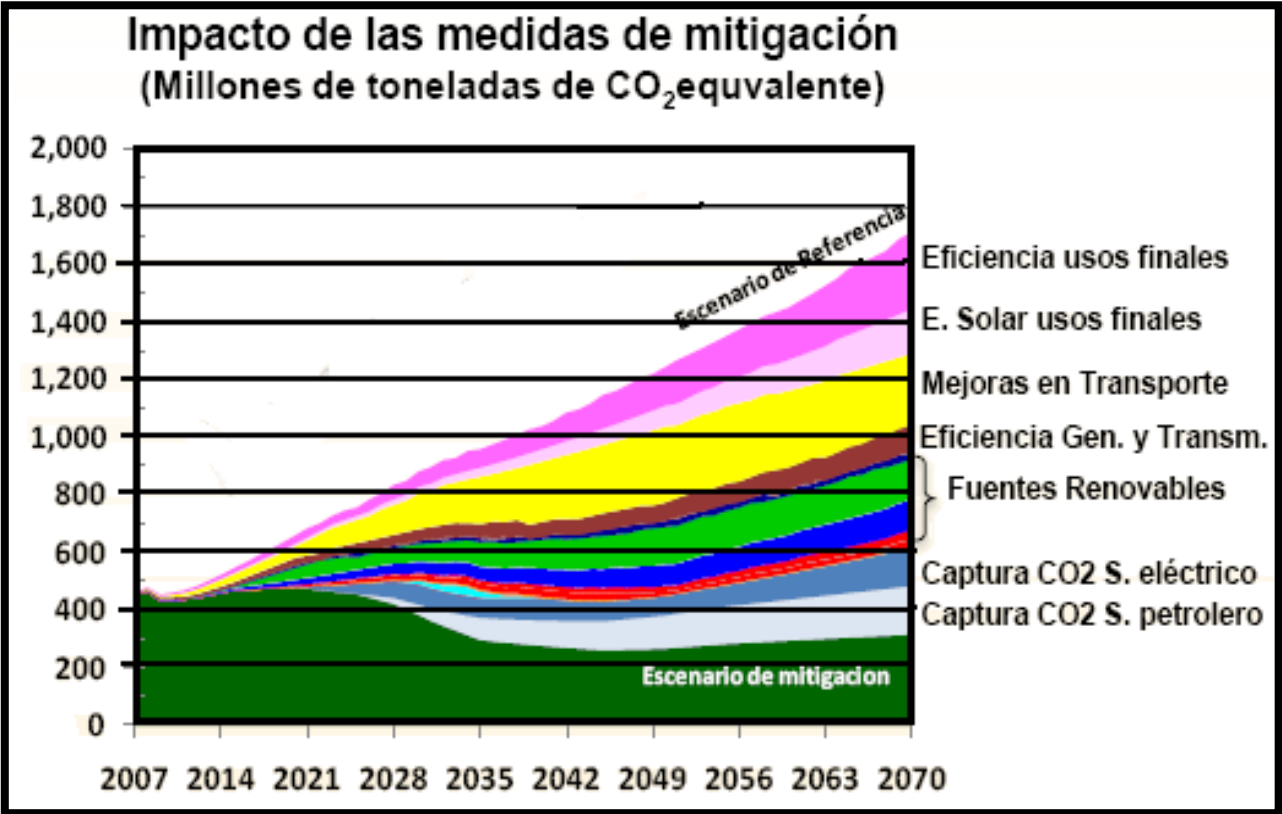


GRÁFICA 2. 5 Emisiones 2011. Fuente: Aguayo F. y K. P. Gallagher, (2005). "Economic reform, energy, and development: the case of Mexican manufacturing", vol.33, number 7, 2005, pp. 829-837.

Es fundamental tomar medidas para reducir la contaminación atmosférica y lo primero es identificar dónde, y en qué actividades, se está contaminando y lo segundo hacer un intento para reducir esas emisiones.

Podemos dividir en dos las estrategias para reducir las emisiones (Grafica2.6) de contaminantes a la atmósfera: ²⁰

1. La aplicación de las últimas tecnologías de punta disponibles (como tecnología de control de emisiones, optimización de los ciclos productivos, nuevas tecnologías para la producción de energía, etcétera).
2. La utilización de manera más eficiente de la energía (por ejemplo la sustitución de la energía fósil por fuentes de energía renovables, modificación de los medios de transporte).



GRÁFICA 2. 6 Impacto de las medidas de mitigación. Fuente: Aguayo F. y K. P. Gallagher, (2005). "Economic reform, energy, and development: the case of Mexican manufacturing", vol.33, number 7, 2005, pp. 829-837.

2.3 Combustibles fósiles en México.

La industria petrolera en México tiene sus inicios a principios del siglo XX cuando la compañía norteamericana “Mexican Petroleum of California” empezó a perforar un campo llamado “el Ébano” en 1901. En México, el 92% de la energía es producida por combustible fósil, por eso es tan importante tener otra fuente primaria de energía que sea limpia y sustentable.²⁴

Los combustibles fósiles más utilizados son el carbón, gas natural, y el petróleo. Todas estas sustancias son extraídas de la corteza terrestre y son procesados para convertirse en productos como la gasolina, gasóleo, y queroseno. Estos hidrocarburos pueden utilizarse para transformarse en plásticos, sustancias químicas, lubricantes, entre otros. Los hidrocarburos son una fuente importante de generación de energía para las industrias. Mediante la aplicación de distintos procesos de transformación (refinación) de los hidrocarburos, se pone a disposición del consumidor una amplia gama de productos, que podemos agrupar en:¹

- Energéticos: que son combustibles específicos para transporte, la industria, la agricultura, la generación de corriente eléctrica y uso doméstico.
- Productos especiales: como lubricantes, asfaltos, grasas para vehículos y productos de uso industrial.

Sin duda, la mayor demanda de hidrocarburos se da para la fabricación de los combustibles que usamos a diario. Los combustibles que más se comercializan en nuestro país son las gasolinas, el keroseno y el diésel.¹

Asimismo, la Industria Petroquímica hace uso de los hidrocarburos produciendo compuestos más elaborados que sirvan de materia prima para las demás industrias. Estos productos petroquímicos dan vida a muchos productos como: plásticos, acrílicos, nylon, fibras sintéticas, guantes, pinturas, envases diversos, detergentes, cosméticos, insecticidas, adhesivos, colorantes, refrigerantes fertilizantes, llantas, etcétera.²⁵

La mayoría de los combustibles fósiles son utilizados para el transporte, fábricas, calefacción, e industrias genéricas de electricidad.

Actualmente en México se emiten alrededor de 188 millones de toneladas de bióxido de carbono, lo que representa aproximadamente el 2% de las emisiones mundiales de gases con efecto invernadero, ocupando así el noveno lugar a nivel mundial entre los países que más contamina.²⁵

Aunque esta contribución es pequeña comparada con los países desarrollados, estando México en los países en vías de desarrollo, su dependencia al combustible fósil hace que su aporte sea elevado.

Las emisiones del país podrían llegar a aumentar hasta un 50% para el 2020 si seguimos con las mismas tendencias de consumismo y con consecuencias de grandes sequías y reducción de tierras para cultivo, riesgos más altos de inundaciones y cambios de distribución geográfica de bosques. Por esta razón es importante buscar nuevas alternativas de energía sustentable y limpia que cubran un porcentaje amplio del requerimiento energético que se tiene.²⁶

2.4 Generación de vapor utilizando hidrógeno como combustible.

Una alternativa de energía sustentable y limpia es la utilización de hidrógeno como combustible para generar vapor.

El generador de vapor es un dispositivo ampliamente utilizado en la industria como proveedor del servicio auxiliar de vapor de agua; esto a través de la transformación de la energía química (combustión del hidrogeno) a energía térmica aprovechando el poder calorífico del combustible (hidrógeno) que lo alimenta bajo determinadas condiciones de presión y temperatura. Los componentes básicos del proveedor principal del servicio auxiliar de vapor son los siguientes:⁴⁴

- Quemador y Hogar (Dispositivo para quemar el combustible)
- Superficie de intercambio de calor (Fluxes)

- Tambor (contenedor)
- Ventilador o turbina (Aparato para mover aire a través de un motor)
- Instrumentación (Medidores de presión, temperatura, flujo, etc.)
- Control de emisiones (Equipo que controla las emisiones contaminantes a la atmósfera).

El generador de vapor que utiliza hidrógeno como combustible va a transmitir el calor a la corriente de agua fría mediante el intercambio de calor con una corriente de vapor de combustión, que como su nombre lo indica proviene de una combustión. Esta combustión es la de hidrógeno con oxígeno.⁴

La producción de hidrógeno a baja escala forma parte de las actividades cotidianas de la actividad económica moderna. Su valor como vector energético y combustible obliga a producirlo masivamente por medio de centrales de electrólisis que operen con electricidad proveniente de las energías renovables: sol, vientos y mares. La electrólisis actualmente operada por sistemas fotovoltaicos y eólicos a baja escala puede ser potenciada a niveles industriales si se desarrollan tecnologías que permitan su hibridación en las costas donde se sumarían las energías marinas.⁴⁵

Esta nueva forma de generación de vapor integrando la electrólisis para obtener el combustible traería beneficios y ventajas, ya se obtendría hidrógeno y oxígeno (como combustibles), electricidad (generada a partir del ciclo físico-químico del agua creado en el generador) y también se catalizaría la producción de agua potable, insumos de la industria química y fomentarían los servicios del ecoturismo y la infraestructura eléctrica para la movilidad sobre redes ferrocarrileras.

La integración de los ciclos de potencia clásicos (ciclo Rankine) al ciclo físico-químico del agua $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons H_2 O$ como combustible da lugar a la existencia de ciclo de potencia de nuevo tipo llamado Chan k'in o también denominado "pequeño sol" quienes pueden sustentar el diseño y la construcción de centrales de energía más eficientes así como una limpia producción de vapor, también es amable con el ambiente y más económica que las convencionales, incluidas las nucleares de última generación.⁴⁵

**CAPITULO 3. SISTEMAS
DE INGENIERÍA PARA
LA TRANSFORMACIÓN
DE ENERGÍA
ELÉCTRICA.**

Capítulo 3 Sistemas de ingeniería para la obtención de energía eléctrica.

La generación de energía eléctrica consiste en transformar alguna clase de energía ya sea química, mecánica, térmica o luminosa, entre otras, en energía eléctrica. Para la generación industrial se recurre a instalaciones denominadas centrales eléctricas. Algunos sistemas de ingeniería para estas centrales son:

Centrales termoeléctricas

Centrales carboeléctricas

Centrales hidráulicas

Centrales mareomotrices

Sistemas híbridos

3.1 Comparación entre la generación de electricidad quemando hidrocarburos y la generada con agua.

La generación de electricidad a partir de combustibles fósiles ha sido el proceso de generación más importante del siglo XX y se anticipa que seguirá siendo dominante durante la mayor parte del siglo XXI.³

En la actualidad el 80% del consumo energético mundial proviene de los combustibles fósiles. En el caso de la electricidad, el 60% se genera a partir de éstos.¹

El uso de combustibles fósiles está siendo cuestionado, fundamentalmente por la producción de dióxido de carbono (CO_2) que se emite a la atmósfera, el cual contribuye a la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI), que es uno de los impulsores del cambio climático, así como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), los cuales se precipitan a través de la lluvia y nieve. También se

deposita acidez en la superficie en forma de partículas secas que en contacto con la lluvia originan un medio corrosivo. Sin embargo, está claro que los combustibles fósiles, representa la opción más efectiva capaz de cubrir la demanda energética mundial. La Agencia Internacional de Energía (AIE) (World Energy Outlook) calcula que para el año 2030, el porcentaje de electricidad generado con combustibles fósiles sea del 66%.

México es uno de los pocos países en los que todavía se utiliza combustóleo (aceite combustible residual derivado de la destilación del petróleo crudo) para generar electricidad, de hecho, hasta fines del siglo XX, casi toda la generación termoeléctrica se hacía con este combustible pero es uno de los combustibles más contaminantes que existen.⁴

Las centrales térmicas convencionales suelen aprovechar entre el 30 y 40 % del valor energético de los combustibles primarios, y lo restante entre el 60 y 70 %, se pierde durante la generación, transmisión y distribución de calor.

Las centrales carboeléctricas prácticamente no difieren en cuanto a su concepción básica de las termoeléctricas convencionales, el único cambio importante es el uso del carbón como combustible y que los residuos de la combustión requieren de un manejo más complejo que en el caso de las termoeléctricas convencionales, que utilizan combustibles líquidos (combustóleo) o gaseosos.¹

Estas utilizan el calor obtenido de la combustión del carbón para poder generar vapor y utilizarlo para mover una turbina que está conectada por un eje al generador eléctrico como se muestra en la figura 3.1.¹

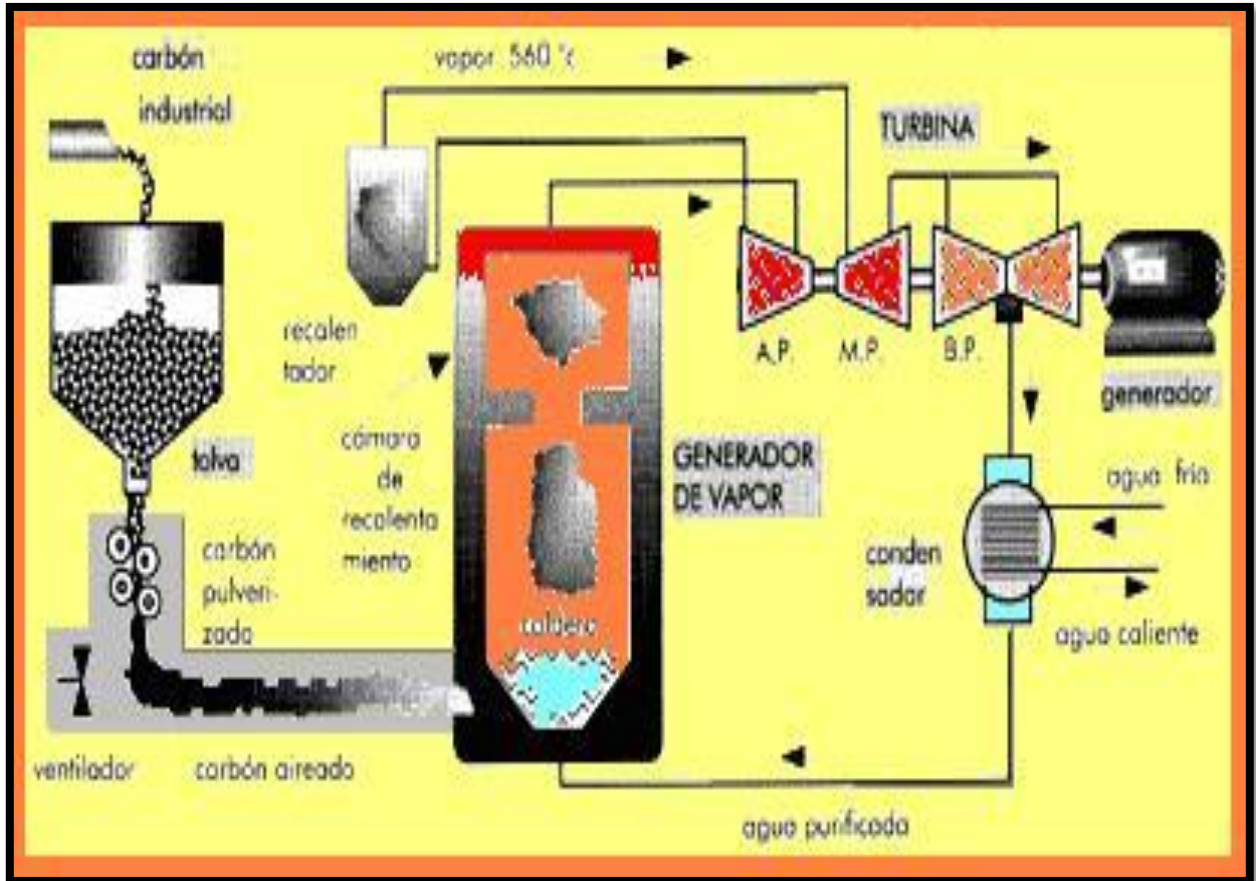


FIGURA 3. 1 Electricidad quemando hidrocarburos. Fuente: Gregorio Gil García, (2008). "Energías del siglo XXI, de las energías fósiles a las alternativas". Ediciones Mundi-Prensa. Capítulo 7, Páginas 277 a la 313.

Las centrales termoeléctricas de tipo vapor están formadas por conjuntos de obras civiles y complejas instalaciones electromecánicas, una central termoeléctrica de este tipo está diseñada para transformar la energía cinética del vapor en electricidad. El vapor se produce a partir de agua desmineralizada, (agua tratada químicamente, a fin de eliminar la gran cantidad de sales disueltas en ella, para lograr la protección interna de todos los componentes del generador de vapor y equipos auxiliares), está se somete a calentamiento por la combustión de gas y/o combustóleo. En la actualidad, el sector eléctrico utiliza combustóleo en aquellas unidades alejadas de los centros urbanos y gas en las cercanas a las ciudades.¹

El vapor se genera en grandes recintos cerrados, denominados generadores de vapor (uno de los componentes principales), cuyas paredes y elementos se encuentran formados por tubos de diámetros y materiales diferentes, por donde

circula el agua durante su proceso de transformación, cuya ebullición produce el vapor que mediante tubos exteriores es conducido hasta las turbinas, en donde la energía cinética del vapor impulsa los álabes de la turbina, convirtiéndose en energía mecánica, produciendo con esto el giro de la misma; este movimiento es transmitido al generador eléctrico, que finalmente lo transforma en electricidad. Por último, el vapor utilizado es descargado al condensador principal, donde pasa a estado líquido, debido al enfriamiento provocado por el sistema de agua de circulación, y es regresada a los generadores de vapor para continuar con el ciclo agua-vapor como se muestra en la figura 3.2.

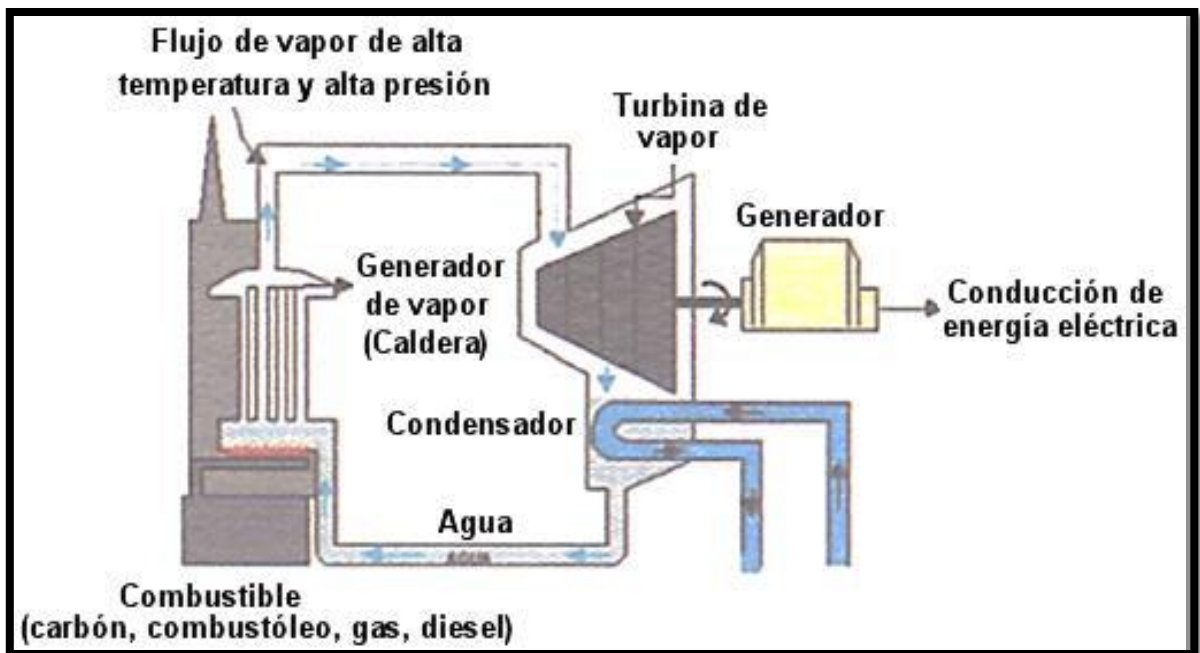


FIGURA 3. 2 Generación de energía eléctrica utilizando agua. Fuente: Gregorio Gil García, (2008). "Energías del siglo XXI, de las energías fósiles a las alternativas". Ediciones Mundi-Prensa. Capítulo 14, Páginas 499 a la 572.

Para esta comparación tenemos que mencionar y describir las formas de obtener energía mediante el agua: la energía hidráulica es la producida por el agua retenida en embalses o pantanos a gran altura, se deja caer hasta un nivel inferior y esta energía potencial se convierte en energía cinética, posteriormente en energía eléctrica en la central hidroeléctrica. Esta energía se genera haciendo pasar la corriente de agua a través de una turbina. La electricidad generada por una caída de agua depende de la cantidad y de la velocidad del agua que pasa a través de la turbina, cuya eficiencia puede llegar al 90%.

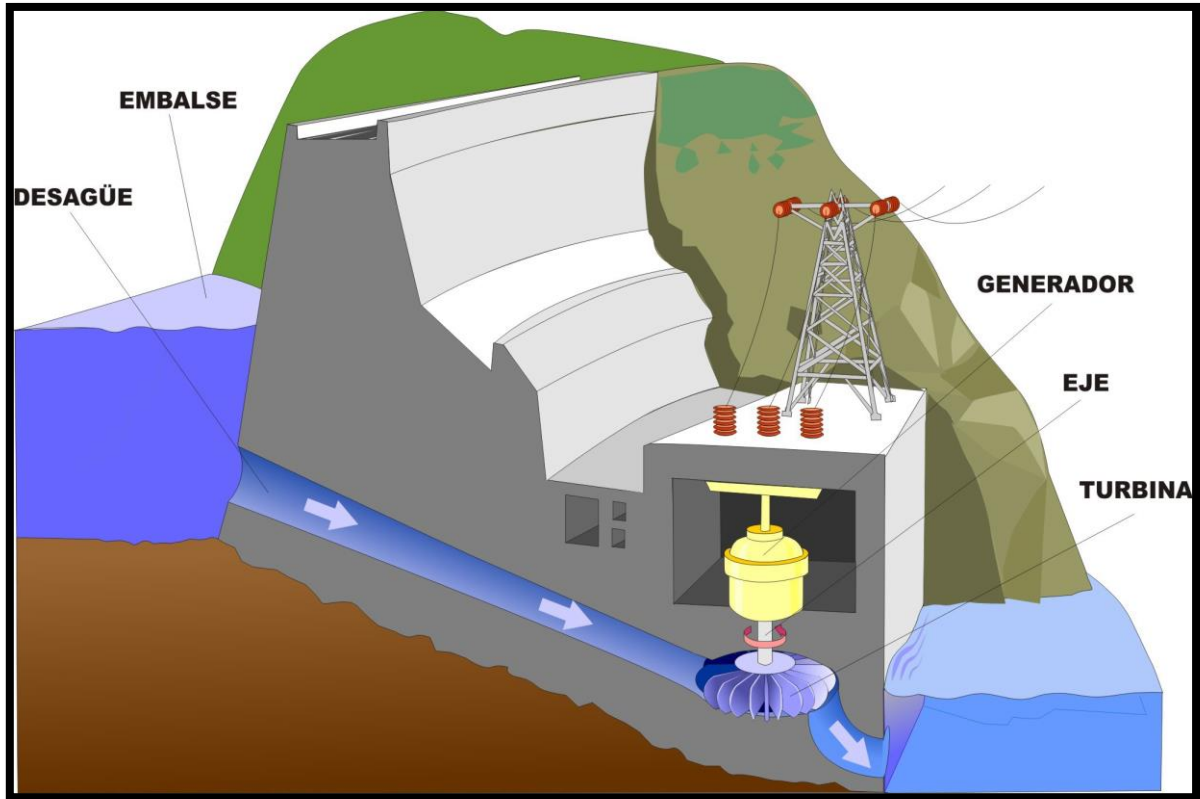


FIGURA 3. 3 Transformación de la energía potencial del agua en energía eléctrica.

Y la generación de la energía eléctrica a partir de la energía mareomotriz es la producida por el movimiento de las masas de agua, generado por las subidas y bajadas de las mareas. Así como por las olas que se originan en la superficie del mar por la acción del viento.

3.2 Sistemas híbridos.¹⁸

Las fuentes de energías renovables como la fotovoltaica, eólica, biomasa, mini hidráulicas y geotérmicas pueden proveer de energía eléctrica limpia y sustentable para el país. Sin embargo, estos tipos de energía renovable son limitados por el hecho de que son intermitentes y varían su producción de acuerdo a periodos estacionales. Una solución para este problema puede ser la producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua, utilizando dicho hidrógeno para producir energía eléctrica cuando se presente una baja en la producción primaria por energías renovables, también se puede utilizar este hidrógeno como combustible en vehículos.¹⁸

La hibridación de los sistemas fotovoltaicos, térmicos y eólicos es una realidad a nivel de comercialización y mercado empresarial; el diseño, la arquitectura e ingeniería en general disponen de una amplia gama de posibilidades de aplicación que satisfacen el requerimiento energético sobre todo de las viviendas, la sustentabilidad al ahorrar y hacer eficiente el uso del agua y la energía, además de elevar la calidad de vida de sus usuarios, tanto en sus espacios de convivencia como el impacto estético que provocan los mismos. Su aplicación en la industria automotriz es sobresaliente.

Los avances, tanto en el estudio del sol como en la del viento, han hecho posible la hibridación en los sistemas de ingeniería referidos. Las energías marinas en estos procesos de hibridación potenciaría de manera exponencial la capacidad de las energías renovables de disminuir las emisiones de gases invernadero en la atmósfera, abatiría la quema de hidrocarburos así como la leña, que es el único combustible en las zonas rurales, disminuiría la presencia de los hidrocarburos y el uranio como combustibles para la generación de electricidad. Un manejo integral, sustentable y bien planeado de las costas para la generación de electricidad por hibridación de las energías renovables que incluyera los mares, además de la obtención de hidrógeno y oxígeno, gases que por sí mismos tienen un alto valor agregado en la industria química, potenciaría la obtención de agua potable por desalinización, salmueras marinas que a su vez son productoras de materia prima para diversos bienes como fertilizantes, cloro, sodio y otros productos de la química inorgánica y catalizaría el desarrollo sustentable de la acuicultura, las redes del ferrocarril eléctrico y los servicios para la industria eco-turística, entre otras. Un diagrama de procesos que sintetiza estos planteamientos mostrando las conversiones y equipos básicos se muestra en la siguiente figura 3.3.¹⁸

La idea central sigue siendo la conversión fisicoquímica del $H_2O \leftrightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$ dinamizada con la hibridación de las energías renovables en las costas.⁴⁵

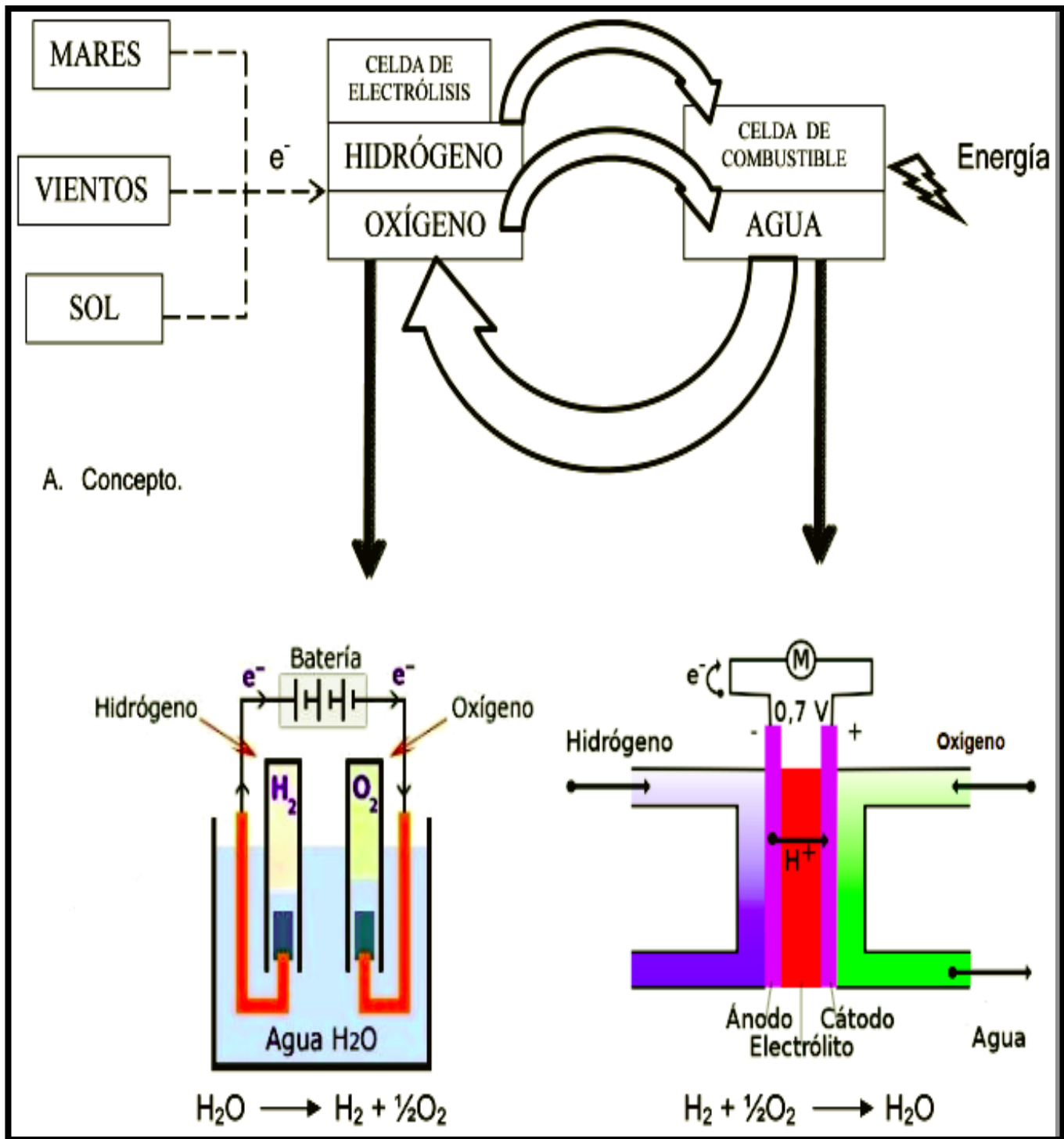


FIGURA 3. 4 Hibridación de las energías renovables en las costas. Fuente: Cátedra Enresa-Iberdrola, (Apuntes) 27 de octubre al 4 de noviembre de 2003, "Ciclo de Energía y Medio Ambiente: Energías Renovables", Madrid, España.

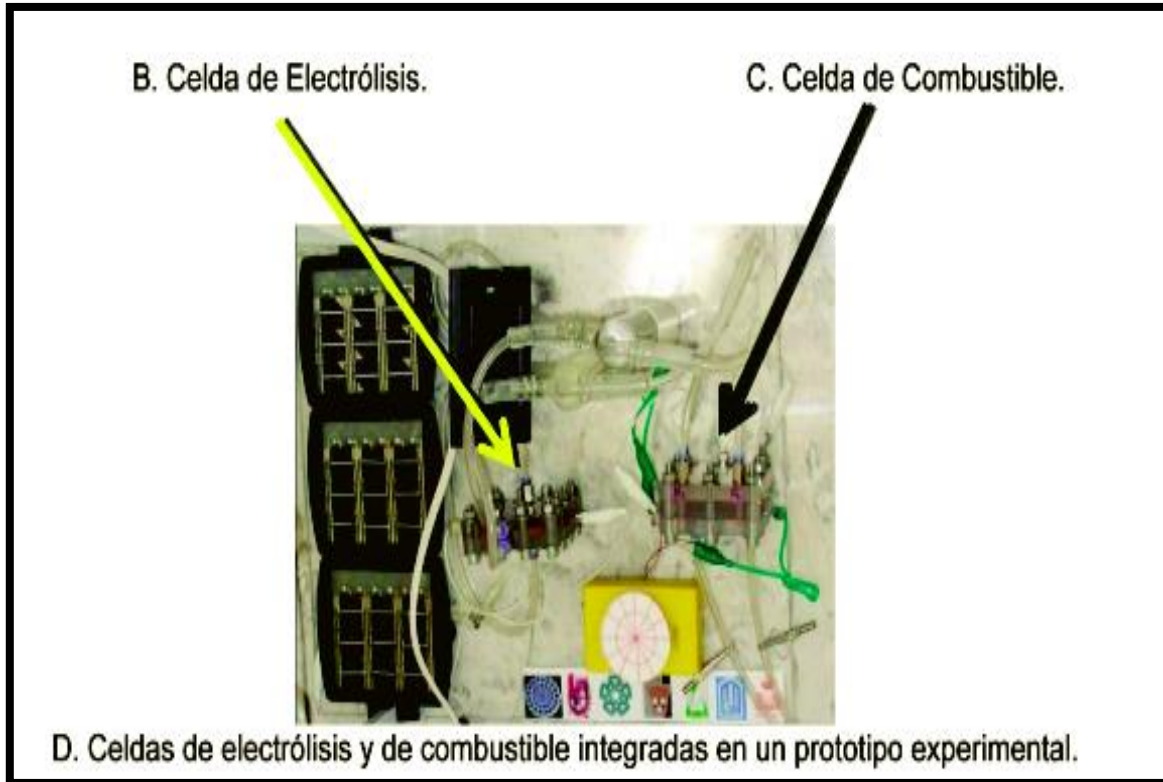


FIGURA 3. 5 Prototipo de una celda de electrolisis para sistemas híbridos. Fuente: Cátedra Enresa-Iberdrola, (Apuntes) 27 de octubre al 4 de noviembre de 2003, "Ciclo de Energía y Medio Ambiente: Energías Renovables", Madrid, España.

3.3 Proceso de transformación de la energía química en eléctrica.

La energía química es la energía interna de un cuerpo y, aunque se encuentra siempre en la materia, sólo se muestra cuando se produce una alteración íntima de ésta.⁵

Este tipo de energía se origina al reaccionar dos o más productos químicos para formar otro distinto. La energía es una propiedad inherente a la materia. La materia posee energía almacenada que se debe a la posición o a la altura de un cuerpo (energía potencial) y a la naturaleza o las sustancias de que esté hecho el cuerpo al que se hace referencia, cada elemento o compuesto le corresponde cierta cantidad de energía química almacenada a la que se le denomina contenido energético. Cuando se lleva a cabo un fenómeno químico, éste va acompañado

por una manifestación de energía, ya sea que haya absorción o desprendimiento de ella, debido su energía almacenada de las sustancias.⁷

Lo anterior significa que, cuando la energía química almacenada de los reactivos es mayor que la energía de los productos, hay un excedente de energía que se libera, pues la energía se mantiene constante, es decir, no se crea ni se destruye.

Una reacción química (Ecuación 3.1) de asombrosa sencillez se perfila como candidata a ser la base del combustible para operar los ciclos de potencia clásicos antes mencionados.⁴⁵



Los ciclos de potencia a los que se les integra el ciclo del combustible descrito por la reacción química como se mencionó anteriormente se le denomina "Chan K'iin" (nombre maya) significa "Pequeño Sol".⁴⁵

No es lo mismo desarrollar tecnologías sucias de billones de dólares para controlar temperaturas de miles de grados que las reacciones nucleares (fisión y fusión) generan, que manejar tecnologías más económicas y seguras que puedan controlar temperaturas de 3 mil grados alcanzadas por la reacción de formación del agua. Otra ventaja definitiva de la reacción es su naturaleza transformable (figura 3.5).⁴²

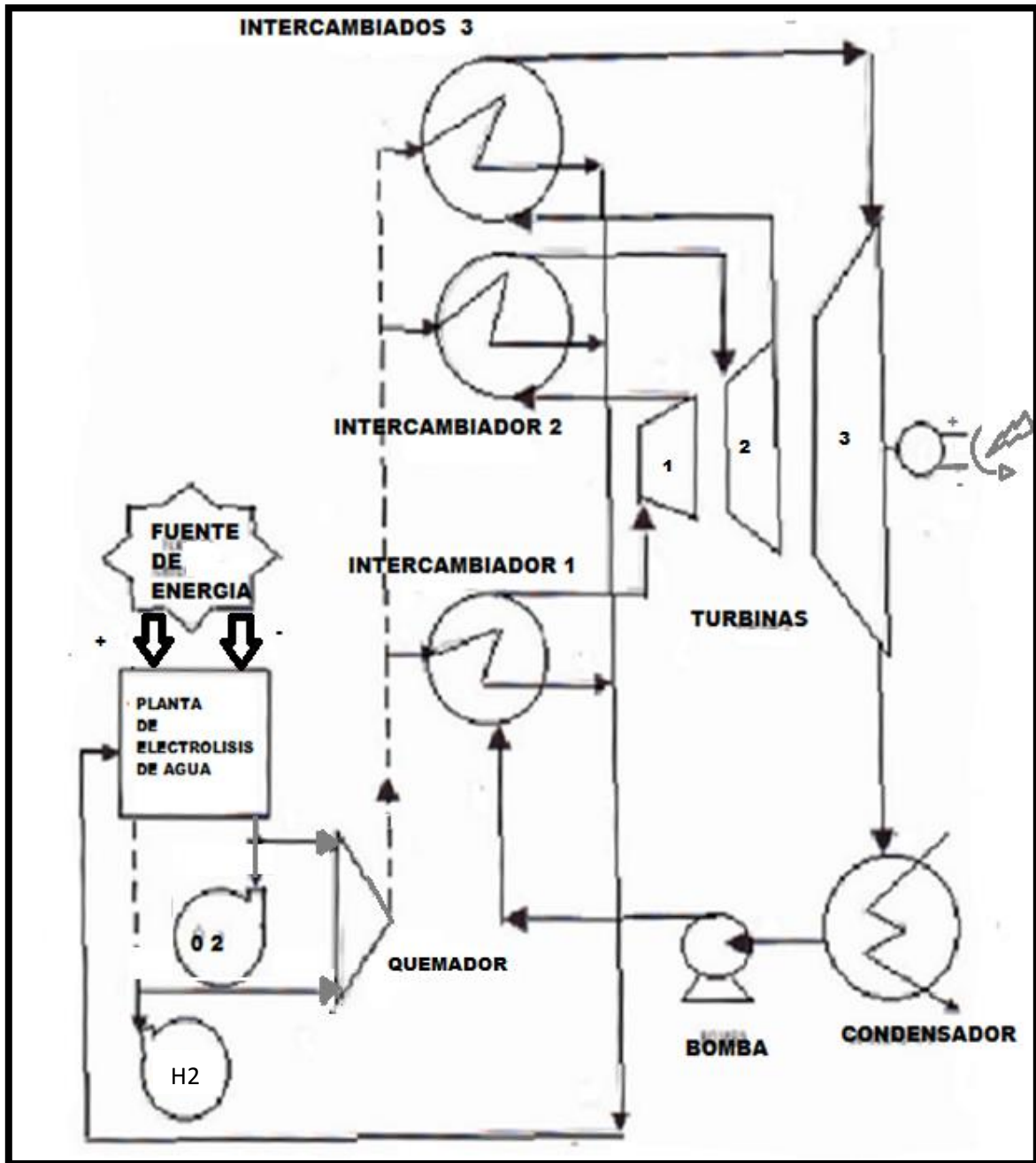


FIGURA 3. 6 Diagrama de flujo de proceso del ciclo Rankine integrado al ciclo físico-químico del agua. Fuente: Rafael Sánchez Dirzo, Rodolfo Silva-Casarín, Edgar G. Mendoza-Baldwin y Rosa de Guadalupe González-Huerta. "Hidrógeno del Mar". Facultad de Estudios Superiores Zaragoza Campus II UNAM. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, Volumen 15, No 1, 2012. Páginas 49 a 61.

CAPITULO 4 CICLOS DE POTENCIA PARA EL VAPOR.

Capítulo 4 Ciclos de potencia para el vapor.

En este tipo de ciclos el fluido experimenta una serie de procesos que requieren el uso de turbinas, compresores, bombas, cambiadores de calor y dispositivos de estrangulamiento (válvulas). El análisis completo de los ciclos requiere de la “segunda ley de la termodinámica. Aquí se analiza el ciclo de potencia de vapor simple utilizado para generar potencia eléctrica.⁶

4.1 Descripción de los ciclos termodinámicos de potencia de vapor.

La potencia eléctrica de la que se dispone en viviendas e industrias se obtiene mediante un generador eléctrico utilizando la potencia del vapor. El generador se mueve mediante la potencia de salida desarrollada por una turbina de vapor, el trabajo de salida en el eje de la turbina (o potencia $W_{turb,sal}$) se produce al expandirse vapor sobrecalentado a alta presión y temperatura, de forma adiabática hasta una presión baja (mezcla húmeda de alta calidad). A continuación, el fluido pasa a presión constante por un cambiador de calor denominado condensador. El calor cedido (q_{cond}) modifica el estado del fluido hasta líquido saturado, luego de esto mediante el trabajo de entrada a la bomba (w_{bomba}) se comprime el fluido (líquido saturado) adiabáticamente hasta la presión de entrada a la caldera. Finalmente, se utiliza una caldera (cambiador de calor) para elevar la temperatura del fluido hasta el valor deseado de entrada en la turbina a presión constante ($P_4 = P_1$). El calor suministrado a la caldera se obtiene del combustible. En la figura 4.1 se muestra el ciclo de potencia básico.⁵

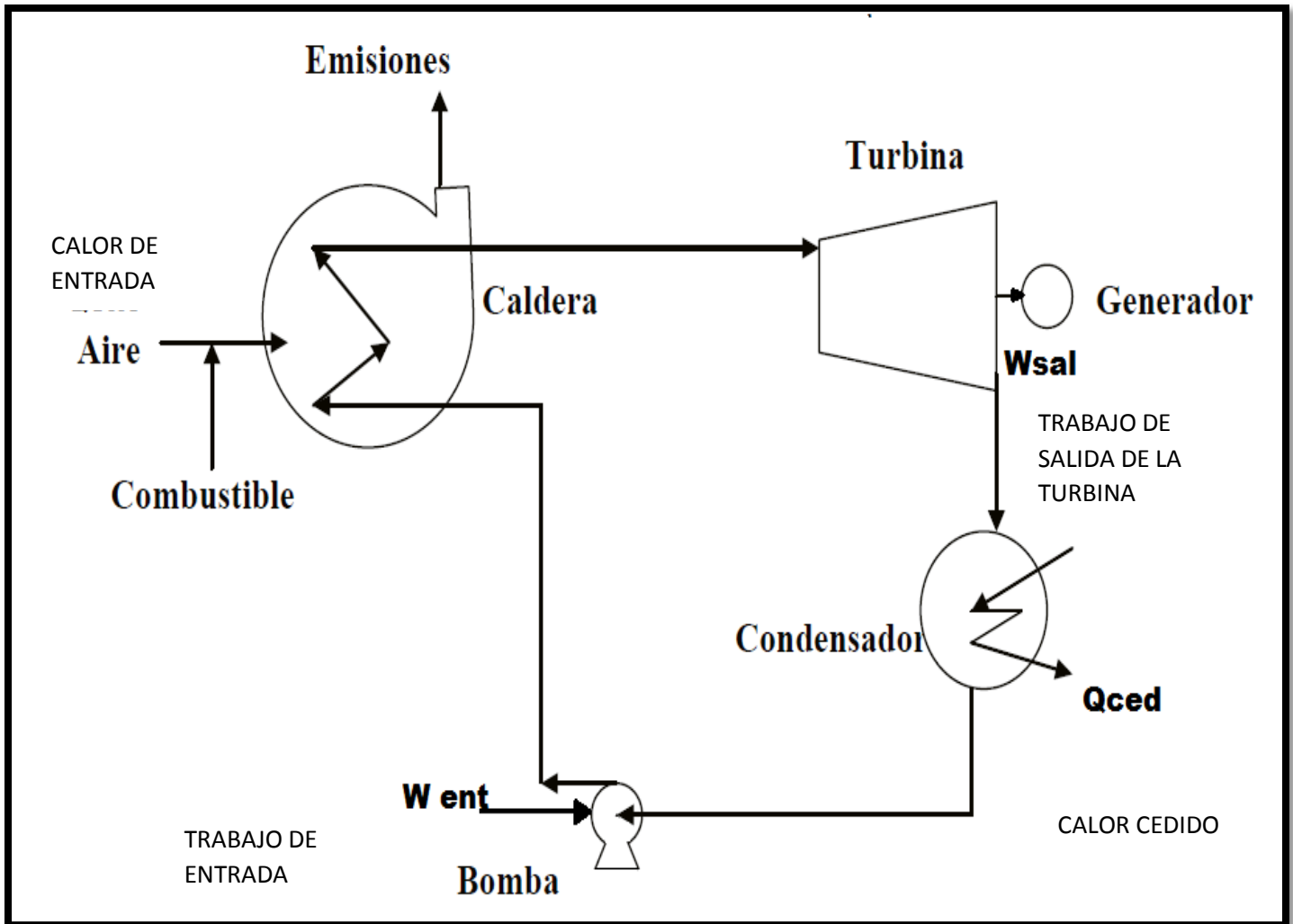


FIGURA 4. 1 Ciclo de Potencia básico. Fuente: Kenneth Wakr, Donald E. Richards (2001). "Termodinámica". 6ª Edición, Mc Graw Hill. Capítulo 16, Páginas 801 a la 845

4.2 Ciclo de Carnot.

El ingeniero francés, Sadi Carnot, investigó los principios que regían la transformación de energía térmica (calor) en energía mecánica (trabajo); sus estudios están basados en la transformación cíclica de un sistema (ciclo termodinámico) conocido en la actualidad como ciclo de Carnot.⁶

El ciclo de Carnot se origina cuando un equipo trabaja absorbiendo una cantidad de calor Q_1 de la fuente de alta temperatura y cede un calor Q_2 a la de baja temperatura originando un trabajo sobre el exterior. La eficiencia viene definida por la ecuación 4.1:⁶

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \dots \dots \dots (4.1)$$

Dónde:

η_{Carnot} = Eficiencia de Carnot

T_2 = Temperatura mayor

T_1 = Temperatura menor

La experiencia nos dice que las máquinas térmicas que operan tomando cierta cantidad de calor a una temperatura T_2 y lo ceden a otra menor T_1 , convierten una fracción del calor absorbido en trabajo, y se deduce teóricamente que incluso una máquina ideal, en condiciones óptimas, no es capaz de convertir en trabajo todo el calor absorbido, sólo una parte, y esta fracción depende de las temperaturas de operación, pero es independiente de la naturaleza de la máquina. En otras palabras, existe una limitación natural de convertibilidad de calor en trabajo. Es mayor la eficiencia que cualquier máquina que funcione cíclicamente entre las mismas fuentes de temperatura. Una máquina térmica que realiza este ciclo se denomina máquina de Carnot.

Los cuatro procesos reversibles que conforman el ciclo de Carnot son los siguientes (figura 4.2):

1. Expansión isotérmica reversible (T_2 =constante)
2. Expansión adiabática reversible (la temperatura disminuye de T_2 a T_1)
3. Compresión isotérmica reversible (T_1 = constante)
4. Compresión adiabática reversible (la temperatura sube de T_1 a T_2)

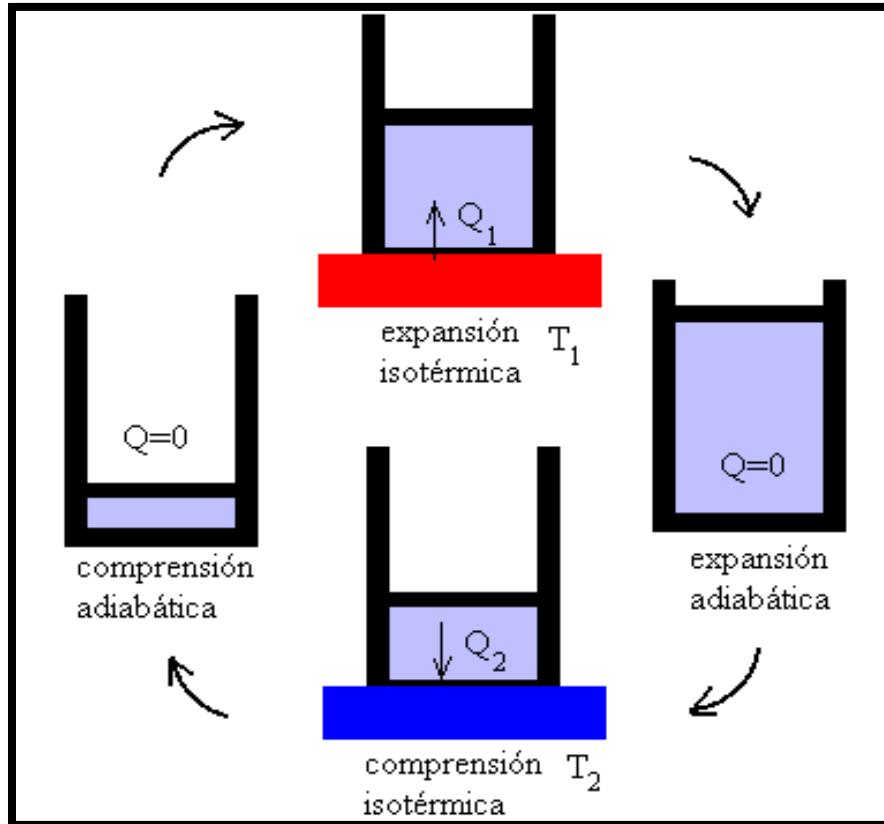


FIGURA 4. 2Ejecución de un ciclo de Carnot en un sistema cerrado. Fuente: YunusÇengel, Michael A. Boles, (2012). "Termodinámica". Mc Graw Hill, 7ª Edición. Capítulo 10, Páginas 559 a la 614.

Como todos los procesos que tienen lugar en el ciclo ideal son reversibles, el ciclo puede invertirse, entonces la máquina absorbe calor de la fuente fría y cede calor a la fuente caliente, teniendo que suministrar trabajo a la máquina. Si el objetivo de esta máquina es extraer calor de la fuente fría se denomina máquina frigorífica, y si es ceder calor a la fuente caliente, se denomina bomba de calor.⁶

4.3 Ciclo Rankine.

El ingeniero y físico escocés William John Macquorn Rankine descubrió el ciclo Rankine llamado así en su honor, es un ciclo termodinámico que convierte el calor en trabajo constituyendo un ciclo de potencia, su eficacia está acotada por la eficiencia termodinámica de un ciclo de Carnot.⁶

Este ciclo es ideal para las centrales eléctricas de vapor. El ciclo Rankine ideal no constituye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto de los siguientes cuatro procesos (figura 4.3):⁶

1-2 Compresión isentrópica (entropía constante) en bomba.

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

3-4 Expansión isentrópica en una turbina.

4-1 Devolución de calor a presión constante en un condensador.

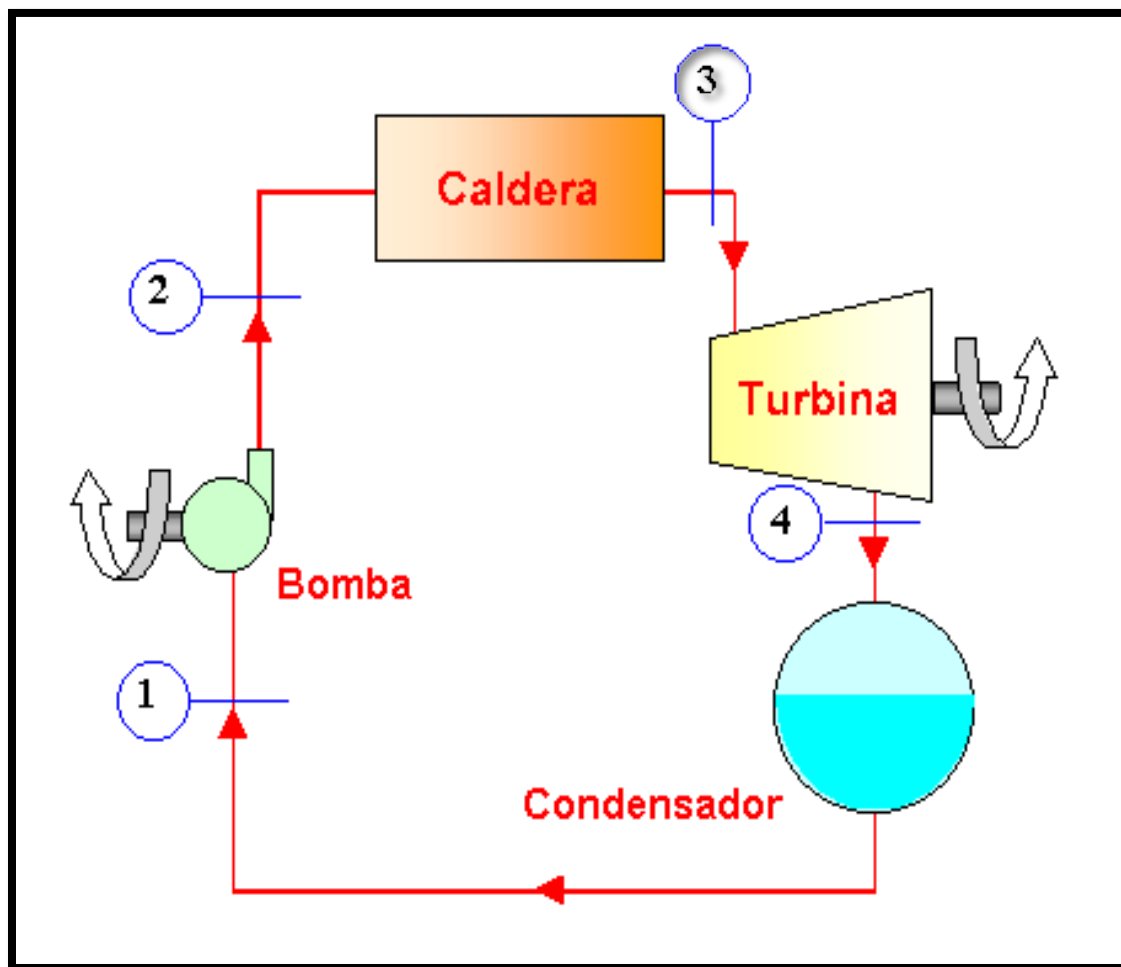


FIGURA 4. 3Ciclo de potencia Rankine. Fuente: YunusÇengel, Michael A. Boles, (2012). "Termodinámica". Mc Graw Hill, 7ª Edición. Capítulo 10, Páginas 559 a la 614.

Los cuatro componentes asociados con el ciclo Rankine (la bomba, la caldera, la turbina y el condensador) son dispositivos de flujo estacionario, por lo tanto los

cuatro procesos que conforman el ciclo Rankine pueden ser analizados como procesos de flujo estacionario. Los cambios en el balance de energía del vapor se reducen a la siguiente ecuación (4.2).⁶

$$\Delta H = Q - W = (q_{entrada} - q_{salida}) + (w_{entrada} - w_{salida}) = h_s - h_e \left(\frac{kJ}{kg}\right) \dots (4.2)$$

Dónde:

ΔH = Diferencial de entalpia

Q= Calor

W= Trabajo

$q_{entrada}$ = calor transferido a la entrada por unidad de masa

q_{salida} = calor transferido a la salida por unidad de masa

$W_{entrada}$ = Trabajo de entrada

W_{salida} = Trabajo de salida

h_s = Entalpía especifica de salida

h_e = Entalpía especifica de entrada

La caldera y el condensador no incluyen ningún trabajo y se supone que la bomba y la turbina son isentrópicas, entonces la relación de conservación de la energía para cada dispositivo puede expresarse en las siguientes ecuaciones como: ⁶

Bomba ($q=0$): $w_{bomba,entrada} = h_2 - h_1 \dots(4.3)$ o $w_{bomba,entrada} = v(P_2 - P_1) \dots(4.4)$

Dónde: $h_1 = h_{f a P_1}$ y $v \cong v_1 = v_{f a P_1} \dots \dots \dots (4.5)$

Caldera ($w=0$): $q_{entrada} = h_3 - h_2 \dots \dots \dots$

(4.6)

Turbina ($q=0$): $w_{turbina,salida} = h_3 - h_4 \dots \dots \dots (4.7)$

Condensador ($w=0$): $q_{salida} = h_4 - h_1 \dots \dots \dots (4.8)$

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se determina a partir de la ecuación 4.9⁶

$$\eta_{ter} = \frac{w_{neto}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} \dots \dots \dots (4.9)$$

Dónde:

$$w_{neto} = q_{entrada} - q_{salida} = w_{turbina,salida} - w_{bomba,entrada} \dots \dots \dots (4.10)$$

La eficiencia de conversión de las centrales eléctricas se expresa a menudo en términos de la tasa térmica (ecuación 4.11).⁶

$$\eta_{ter} = \frac{3412 \left(\frac{BTU}{kWh}\right)}{Tasa\ termica \left(\frac{BTU}{kWh}\right)} \dots \dots \dots (4.11)$$

Dónde:

q= calor transferido

h= Entalpía

w=trabajo

v= volumen específico

P= presión

η_{ter} = eficiencia térmica

4.4 Incremento de la eficiencia del ciclo Rankine.⁵

La eficiencia térmica de un ciclo de energía de vapor se incrementa cuando se elevan la presión y, por tanto, la temperatura de vaporización en la caldera.

No obstante, estas mismas condiciones incrementan la inversión de capital en la planta, porque requieren tanto construcción más pesada como materiales de construcción de mayor costo, estos costos se elevan aún más rápidamente a medida que se impongan condiciones más severas.⁵

La eficiencia térmica de una planta de energía aumenta a medida que la presión en el condensador se reduce, por tanto, la temperatura en el condensador es menor. Sin embargo, la temperatura de condensación debe ser superior a la temperatura del medio de enfriamiento, que usualmente es agua, esto está controlado por las condiciones locales de clima y la geografía del lugar. Las plantas de energía operan universalmente con la presión del condensador tan baja como sea posible.⁵

Las plantas de energía modernas operan con una modificación del ciclo de Rankine que incorpora calentadores del agua de alimentación.

Las centrales eléctricas de vapor son responsables de producir la mayor parte de la energía eléctrica del mundo, e incluso pequeños incrementos en la eficiencia térmica pueden significar grandes ahorros en los requerimientos de combustible. En consecuencia, es válido cualquier esfuerzo para mejorar la eficiencia del ciclo con que operan las centrales eléctricas de vapor.⁵

4.4.1 Efectos de la presión y temperatura para el ciclo Rankine.

El objetivo de modificar el ciclo de potencia Rankine es para incrementar la eficiencia térmica del ciclo: incrementar la temperatura promedio a la que el calor se transfiere al fluido de trabajo en la caldera, o disminuir la temperatura promedio a la que el calor se rechaza del fluido de trabajo en el condensador. Es decir, la temperatura promedio del fluido debe ser lo más alta posible durante la adición de calor y lo más baja posible durante el rechazo de calor.⁵

4.4.1.1 Reducción de la presión del condensador (reducción de $T_{baja, prom}$).

El agua se encuentra como vapor húmedo en el condensador a la temperatura de saturación correspondiente a la presión dentro del condensador. Por consiguiente, la reducción de la presión de operación del condensador reduce automáticamente la temperatura del vapor, y por lo tanto la temperatura a la cual el vapor es rechazado.⁵

El efecto de la reducción de la presión del condensador en la eficiencia del ciclo Rankine se muestra en la figura 4.4 (diagrama T-S. Existe un aumento en la salida neta del trabajo debido a la disminución de la presión del condensador.⁵

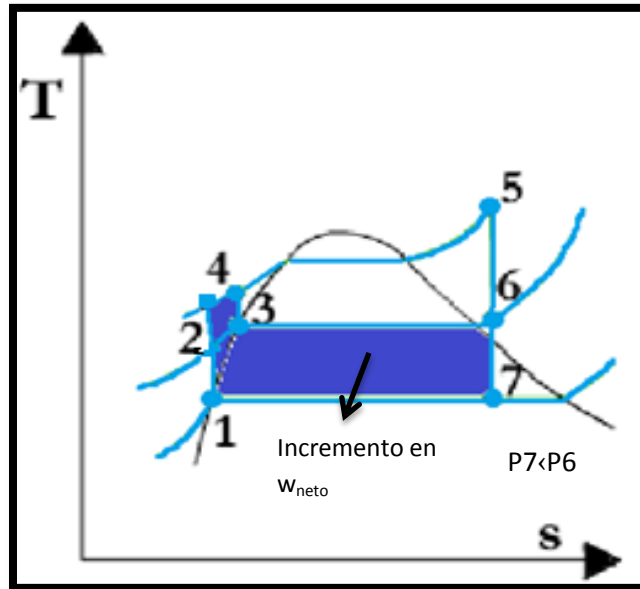


FIGURA 4. 4 Diagrama T-S, efecto de la reducción de la presión del condensador. Fuente: YunusÇengel, Michael A. Boles, (2012). "Termodinámica". Mc Graw Hill, 7ª Edición. Capítulo 10, Páginas 559 a la 614.

Los requerimientos de entrada de calor también aumentan pero este incremento es pequeño, por lo tanto, el efecto total de reducir la presión del condensador es un aumento en la eficiencia térmica del ciclo.

Para aprovechar el aumento de eficiencia a bajas presiones, los condensadores de las centrales eléctricas de vapor operan a presión menor a la atmosférica. Esto es un problema porque los ciclos de potencia de vapor operan en un circuito cerrado. Existe un límite inferior a utilizar para la presión del condensador, límite que no puede ser menor a la presión de saturación correspondiente a la temperatura del medio de enfriamiento.⁵

La reducción de la presión del condensador (figura 4.4) no deja de tener efectos colaterales. Porque crea la posibilidad de las filtraciones de aire dentro del condensador e incrementa el contenido de humedad del vapor en las etapas finales de la turbina. La presencia de grandes cantidades de humedad es

indeseable en la turbina, porque disminuye su eficiencia y erosiona sus álabes (paleta curva de una turbomáquina).

Como se muestra en la figura 4.4 cuando se disminuye la presión del vapor a la descarga de la turbina del valor P6 al valor P7 se aumenta el trabajo producido por el ciclo, en una proporción que se indica por el área sombreada, con respecto al trabajo que se produce cuando la presión de descarga del vapor es P6. El calor consumido en la caldera se incrementa ligeramente en la proporción mostrada en la curva 2-4, y el calor entregado en el condensador, que antes era 6-3, se incrementa un poco en 7-1. Esto implica por supuesto que al condensador se le debe acoplar algún sistema para producir vacío.⁵

4.4.1.2 Incremento de la presión de la caldera (incremento de $T_{alta, prom}$).⁵

Existe otra manera de incrementar la temperatura promedio durante el proceso de adición de calor, consiste en aumentar la presión de operación de la caldera, lo cual eleva automáticamente la temperatura de ebullición. Esto a su vez eleva la temperatura promedio a la cual se transfiere calor al vapor y de ese modo incrementa la eficiencia térmica del ciclo.⁵

El efecto de aumentar la presión de la caldera en el desempeño de los ciclos de potencia de vapor es notable en el diagrama temperatura-entropía (figura 4.5 T-S).

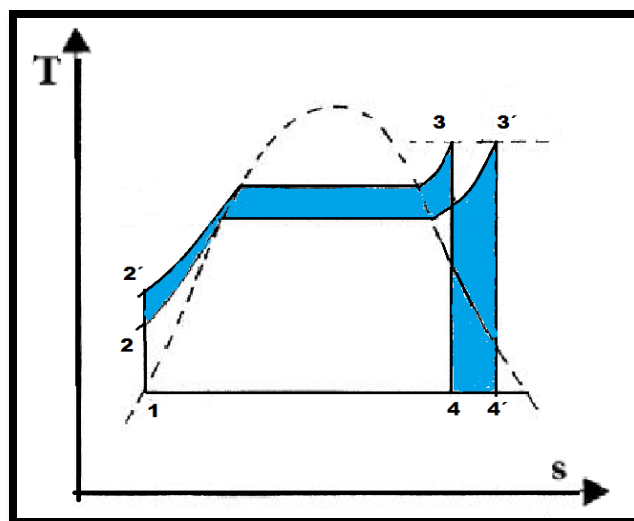


FIGURA 4. 5 Diagrama T-s El efecto de aumentar la presión de la caldera. Fuente: YunusÇengel, Michael A. Boles, (2012). "Termodinámica". Mc Graw Hill, 7ª Edición. Capítulo 10, Páginas 559 a la 614.

Para una temperatura de entrada fija a la turbina, el ciclo se corre a la izquierda y aumenta el contenido de humedad del vapor en la salida de la turbina, este efecto colateral puede corregirse al recalentar vapor.⁵

Los efectos de reducir la presión del condensador e incrementar la presión de la caldera incrementan considerablemente la eficiencia térmica del ciclo Rankine.

Como lo muestra la figura 4.5 al elevarse la presión de la caldera se coloca más arriba el límite superior del ciclo de Rankine y aumenta la superficie encerrada por el ciclo y con ello su rendimiento.

La máxima presión de interés práctico es del orden de 340 ata (presión atmosférica absoluta), que es algo más alta que lo usual, ya que en la mayoría de las calderas hipercríticas (se denomina así a las calderas que operan a presiones mayores a la crítica que es 218 ata). El gráfico nos muestra el efecto de la presión máxima en el rendimiento del ciclo de Rankine.⁵

De lo observado en el diagrama T-S se deduce que la alta presión de entrada a la turbina se debe usar combinada con el recalentamiento del vapor para obtener un efecto mayor sobre el rendimiento del ciclo de Rankine.

4.4.2 Sobrecalentamiento del vapor.⁵

La temperatura promedio a la que el calor es transferido hacia el vapor puede ser incrementada sin aumentar la presión de caldera, gracias al sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas (figura 4.6).⁵

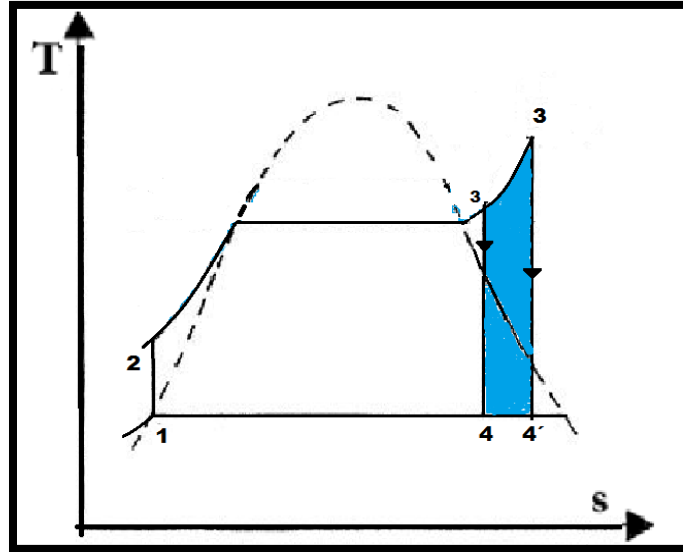


FIGURA 4. 6 Diagrama T-S para el efecto del sobrecalentamiento del vapor. Fuente: YunusÇengel, Michael A. Boles, (2012). "Termodinámica". Mc Graw Hill, 7ª Edición. Capítulo 10, Páginas 559 a la 614.

Este efecto provoca el aumento en el trabajo neto, y el aumento en la entrada de calor. Sin embargo, el efecto total es un incremento en la eficiencia térmica, porque aumenta la temperatura promedio a la cual se añade calor.

El sobrecalentamiento del vapor a temperaturas más altas tienen otro efecto muy importante: disminuye el contenido de humedad del vapor a la salida de la turbina. Pero la temperatura a la que el vapor se sobrecalienta está limitada debido a los materiales con los que están hechos los equipos (turbina).⁵

Como lo muestra la figura 4.6 si luego de saturar el vapor se continúa calentando a fin de llevarlo hasta la zona de vapor sobrecalentado, la ganancia de superficie encerrada por el ciclo viene representada por la zona sombreada en el diagrama T-S. Desde el punto de vista teórico, encontramos justificación en el hecho de que cuanto más alta sea la temperatura del vapor, mayor cantidad de calor se transformara en trabajo en la turbina, y por lo tanto menos irreversible será el proceso, incrementado el rendimiento térmico del ciclo; Además de reducir los efectos perjudiciales de la humedad del vapor en la turbina (erosión de los alabes).

4.4.3 Recalentamiento.⁵

El ciclo de recalentamiento fue introducido a mediados de la década de los 20's, se abandonó en los años 30's por sus dificultades de operación, pero al final de los 40's fue necesario reintroducirlo.⁵

El recalentamiento es una solución al problema de humedad inaceptable en la turbina, ya que puede dañar el equipo.

Para poder aprovechar la mayor eficiencia a presiones más altas de la caldera sin tener que enfrentar el problema de humedad excesiva en la etapa final de la turbina se tienen dos soluciones:⁵

1. Sobrecalentar el vapor a temperaturas muy altas antes de que entre a la turbina. Lo cual incrementa la eficiencia del ciclo porque la temperatura promedio a la que se añade calor también se incrementa. Pero no es una solución viable puesto que se requiere elevar la temperatura de vapor a niveles muy altos y peligrosos.
2. Expandir el vapor en la turbina en dos etapas y recalentarlo entre ellas, se modifica el ciclo Rankine ideal simple con un proceso de recalentamiento. El recalentamiento es una solución práctica al problema de humedad excesiva en turbinas esto sucede comúnmente en la centrales eléctricas.

En el ciclo con recalentamiento, el vapor no se expande por completo en una sola etapa hasta la presión del condensador. Luego de expandirse parcialmente, el vapor se extrae de la turbina y se recalienta a presión constante. A continuación, se devuelve a la turbina para su expansión posterior hasta la presión de salida. Se puede considerar que la turbina está constituida por dos etapas, una de alta y otra de baja presión. El ciclo Rankine ideal con recalentamiento difiere del ciclo Rankine ideal simple en que el proceso de expansión sucede en dos etapas. (Figuras 4.7 y 4.8).⁵

1. En la turbina de alta presión, el vapor se expande isentrópicamente hasta una presión intermedia y regresa a la caldera donde se recalienta a presión constante, hasta la temperatura de entrada de la primera turbina.
2. Después el vapor se expande isentrópicamente en la turbina de baja presión hasta la presión del condensador. De modo que la entrada de calor total y la salida total de trabajo de la turbina es un ciclo de recalentamiento.

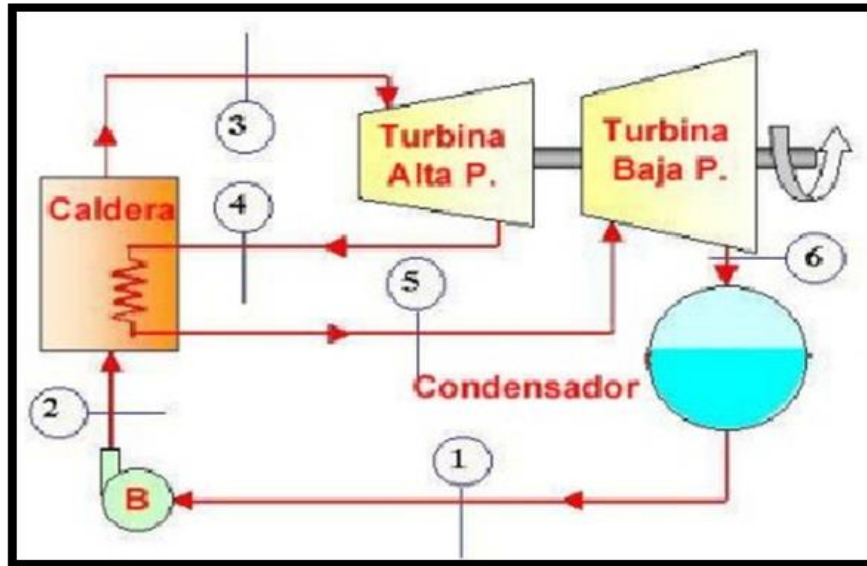


FIGURA 4. 7 Ciclo de potencia Rankine con efecto de recalentamiento. Fuente: YunusÇengel, Michael A. Boles, (2012). "Termodinámica". Mc Graw Hill, 7ª Edición. Capítulo 10, Páginas 559 a la 614.

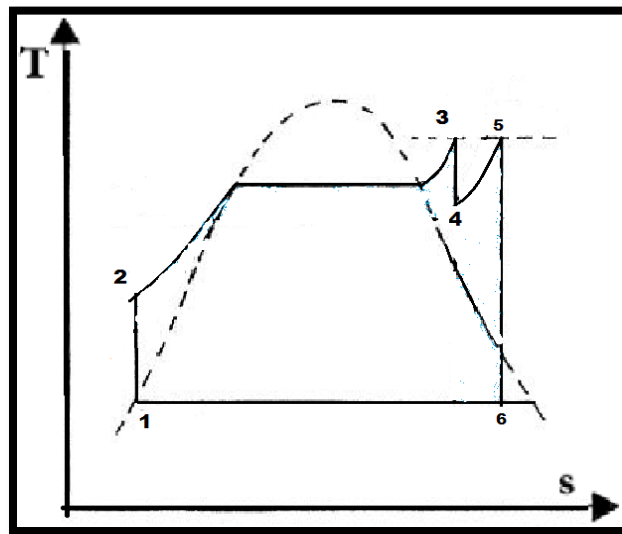


FIGURA 4. 8 Diagrama T-S para el efecto de recalentamiento. Fuente: YunusÇengel, Michael A. Boles, (2012). "Termodinámica". Mc Graw Hill, 7ª Edición. Capítulo 10, Páginas 559 a la 614.

En la figura 4.8 del diagrama T-S para el efecto de recalentamiento existen dos expansiones isentrópicas (P3 y P5) de los puntos 3-4 existe recalentamiento, del 6-1 existe un enfriamiento isobárico, de 1-2 hay una compresión isoentrópica y de 2-3 existe un calentamiento de líquido a vapor.

El ciclo de recalentamiento se expresa de la siguiente forma (4.11 y 4.12):

$$q_{entrada} = q_{primario} + q_{recalentamiento} = (h_3 - h_1) + (h_5 - h_4) \dots \dots \dots (4.11)$$

$$W_{turbina,salida} = w_{turbina,I} + w_{turbina,II} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \dots \dots \dots (4.12)$$

Dónde:

q= calor transferido

h= entalpia

w= trabajo

La incorporación de un recalentamiento simple en una central eléctrica mejora la eficiencia del ciclo en un 4 o 5 %, ya que se incrementa la temperatura promedio a la cual el calor se transfiere al vapor.

4.4.4 Regeneración.

El ciclo regenerativo consiste en extraer parte del vapor expandido en la turbina y utilizarlo para suministrar calor al fluido de trabajo, aumentado su temperatura antes de pasar por la fuente principal de calor (Caldera) a una presión determinada. Existen dos tipos de calentadores uno denominado calentador abierto o de contacto directo y el calentador cerrado o cambiador de calor de carcasa y tubos.

4.4.4.1 CICLO RANKINE CON CALENTADORES ABIERTOS.⁵

En el caso ideal regenerativo del ciclo, se ajustan los flujos másicos de las corrientes que entran al calentador, de manera que el resultado de la mezcla a la salida del calentador sea líquido saturado a una presión determinada. Las presiones de entrada deben ser iguales, para que no se produzcan retornos indeseables en las líneas de tuberías.

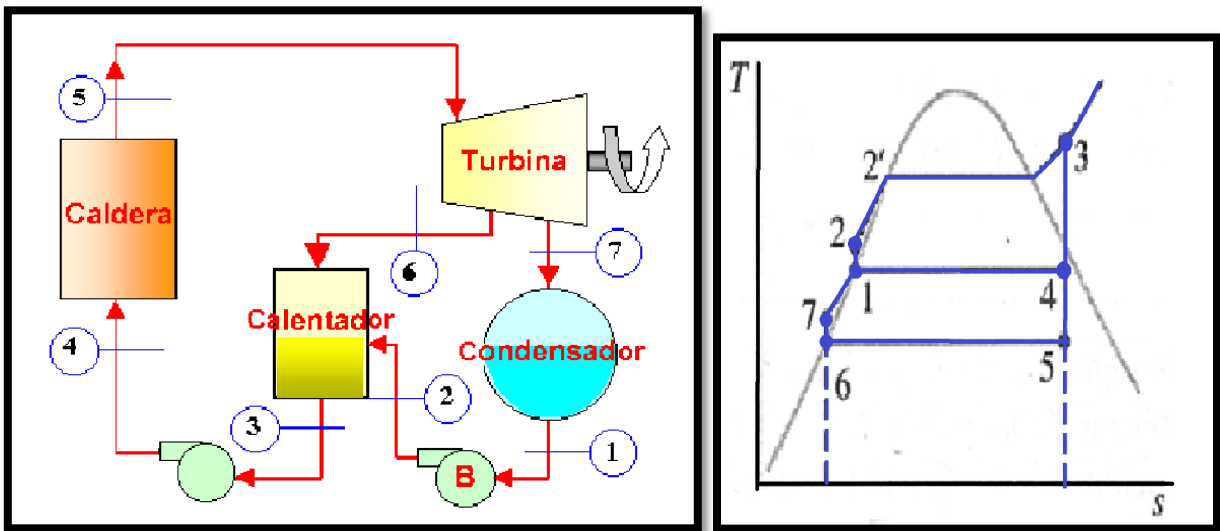


FIGURA 4. 9 Esquema de instalación y diagrama T-S de un ciclo de potencia de vapor ideal regenerativo con calentador abierto de alimentación. Fuente: YunusÇengel, Michael A. Boles, (2012). "Termodinámica". Mc Graw Hill, 7ª Edición. Capítulo 10, Páginas 559 a la 614.

En la figura 4.9 en el diagrama T-S se considera que el vapor está saturado al inicio de la expansión. La curva 2'-3 es paralela a la 1-4 puesto que se postuló que el calentamiento es reversible. Se observara que el incremento de Entropía durante el calentamiento es igual a la disminución durante la expansión y enfriamiento del vapor, y que el área 2, 3, 4, 1 es igual al área 6, 7, 1, 4, 5.

El análisis teórico de un calentador abierto en un ciclo ideal regenerativo se emplean los principios de conservación de la masa y la energía aplicados al volumen de control mostrado en la figura 4.10.⁶

$$\sum m_{ent} = \sum m_{sal} \longrightarrow m_6 + m_2 = m_3 \dots \dots \dots (4.13)$$

De la misma manera, el balance de energía con $Q = 0$ y $W = 0$ es:⁶

$$\sum m_{ent} h_{ent} = \sum m_{sal} h_{sal} \quad \longrightarrow \quad h_3 m_3 = h_6 m_6 + h_2 m_2 \dots\dots\dots (4.14)$$

Eliminando al combinar las ecuaciones m_7 al combinar las ecuaciones tenemos:

$$h_3 m_3 = h_6 m_6 + h_2 m_2 + (m_3 - m_6) h_2 \dots\dots\dots (4.15)$$

Dividiendo toda la ecuación entre la masa tota tenemos:⁶

$$h_3 = \frac{m_6}{m_3} h_6 + \left(1 - \frac{m_6}{m_3}\right) h_2 \dots\dots\dots (4.16)$$

Si la fracción de vapor de agua extraída de la turbina m_4/m_1 , en el estado 4 se representa por y_A , en la ecuación entonces: ⁶

$$1(h_3) = y_A h_6 + (1 - y_A) h_2 \dots\dots\dots (4.17)$$

El trabajo total que sale de la turbina, referido a la unidad de masa que atraviesa la zona de la caldera y el sobrecalentador, es: ⁶

$$W T_{sal} = \frac{w T_{sal}}{m_3} = 1 (h_5 - h_6) + (1 - y_A)(h_6 - h_7) \dots\dots\dots (4.18)$$

El trabajo de la bomba de condensado en condiciones isentrópicas, referido a la masa que atraviesa al condensador, es: ⁶

$$w_{B,ent} = v f_1 (P_2 - P_1)(1 - y_A) \dots\dots\dots (4.19)$$

El trabajo de la bomba de alimentación en condiciones isentrópicas, referido a la masa total del ciclo, es: ⁶

$$w_{B,ent} = v f_3 (P_4 - P_3) \dots\dots\dots (4.20)$$

Dónde:

Σ = sumatoria

Q= calor

W= trabajo

y= fracción de vapor de agua

f =valor del líquido saturado

H= entalpia

M= masa

T_{sat} = temperatura de saturación

4.4.4.2 CICLO RANKINE CON CALENTADORES CERRADOS.⁵

En este ciclo ideal regenerativo se utiliza un calentador cerrado, en donde no se mezclan las corrientes que entran. El agua de alimentación circula por el interior de los tubos que pasan por el calentador y el vapor extraído de la turbina para precalentar el agua, se condensa sobre los tubos como se muestra en la Figura 4.10.⁵

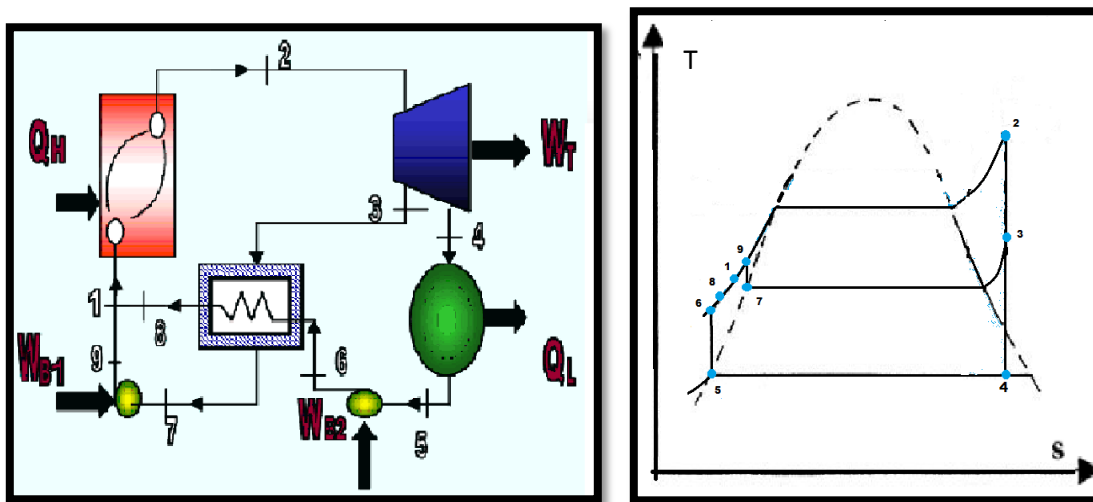


FIGURA 4. 10 Esquema de instalación y diagrama T-S de un ciclo de potencia de vapor ideal regenerativo con calentador cerrado de alimentación. Fuente: YunusÇengel, Michael A. Boles, (2012). "Termodinámica". Mc Graw Hill, 7ª Edición. Capítulo 10, Páginas 559 a la 614.

En el caso ideal, se supone que el agua de alimentación proveniente del condensador sale del calentador como líquido comprimido a la misma temperatura que el vapor de agua extraído que ha condensado (ver figura (a)). La particularidad de los calentadores cerrados es que las 2 corrientes que atraviesan el calentador no están en contacto directo por lo que sus presiones pueden ser distintas.⁶

A continuación en la figura 4.11, se presentan dos arreglos de calentadores cerrados de agua de alimentación: a) Bombeo directo del vapor condensado a la línea del agua de alimentación de la caldera, b) Atrapa (por estrangulamiento) el vapor condensado y lo lleva a una zona de menor presión de la línea de agua de alimentación.⁶

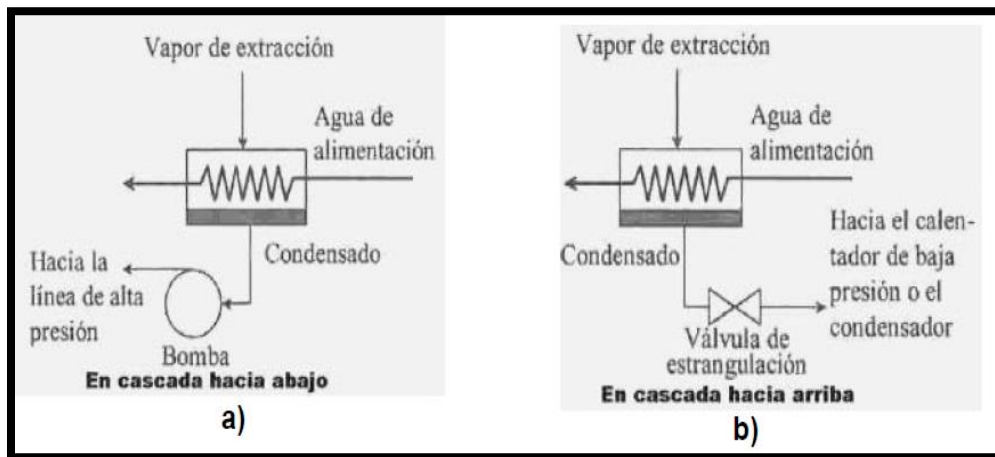


FIGURA 4. 11 Esquema de un calentador cerrado de agua de alimentación a) bombea directamente el condensado hacia la línea de alimentación de la caldera y b) atrapa (por estrangulamiento) el vapor condensado y lo lleva a una zona de menor presión. Fuente: YunusÇengel, Michael A. Boles, (2012). "Termodinámica". Mc Graw Hill, 7ª Edición. Capítulo 10, Páginas 559 a la 614.

Para cualquiera de los arreglos de los calentadores cerrados, el balance de energía en régimen estacionario supone que el calentador está aislado térmicamente y que las variaciones de la energía cinética y potencial de las corrientes son despreciables. Téngase en cuenta que los valores en esta ecuación no son iguales.

$$0 = (m\Delta h)_{extr} + (m\Delta h)_{alim} \dots \dots \dots (4.21)$$

4.5 Cogeneración.

Los sistemas de cogeneración son sistemas de producción conjunta de electricidad (o energía mecánica) y de energía térmica útil (calor) partiendo de un único combustible. El gas natural es la energía primaria más utilizada para el funcionamiento de las centrales de cogeneración de electricidad calor, las cuales funcionan con turbinas o motores de gas. Es hoy, una alternativa como método de

conservación de energía para la industria, acorde con las políticas de globalización económica regional y a la política internacional orientada a lograr un desarrollo sustentable.¹

En un proceso de cogeneración, el calor se presenta en forma de vapor de agua a alta presión o en forma de agua caliente. Por ejemplo, se puede utilizar el vapor caliente que sale de una turbina de producción de energía eléctrica, para suministrar energía para otros usos.

La energía mecánica puede ser utilizada tanto para manejar un alternador para producir electricidad, o equipos rotativos como motor, compresor, bomba o un ventilador para la entrega de diversos servicios. La energía térmica puede utilizarse para aplicaciones de proceso directa o indirectamente para la producción de vapor, agua caliente, aire caliente para secadora o agua fría para refrigeración de proceso.¹

La cogeneración ofrece una amplia gama de tecnologías para su aplicación en diversos ámbitos de la actividad económica. La eficiencia global del uso de energía en modo de cogeneración puede ser de hasta 85 por ciento y más en algunos casos.¹

VENTAJAS

- Ahorra energía y mejora la seguridad del abastecimiento.
- Disminuye las pérdidas de la red eléctrica, especialmente porque las centrales de cogeneración se suelen situar próximas a los lugares de consumo
- Aumenta la competencia entre los productores
- Permite crear nuevas empresas
- Se adapta bien a las zonas aisladas o ultraperiféricas (geográficamente alejado).

En los sistemas de cogeneración el combustible empleado para generar la energía eléctrica y térmica es mucho menor que el utilizado en los sistemas convencionales de generación de energía eléctrica y térmica por separado, es

decir, que del 100% de energía contenida en el combustible, en una termoeléctrica convencional sólo 33% se convierte en energía eléctrica, el resto se pierde a través del condensador, los gases de escape, las pérdidas mecánicas, las pérdidas eléctricas por transmisión y distribución entre otras.

En los sistemas de cogeneración (figura 4.12), se aprovecha hasta el 84% de la energía contenida en el combustible para la generación de energía eléctrica y calor a proceso (25-30% eléctrico y 59-54% térmico).

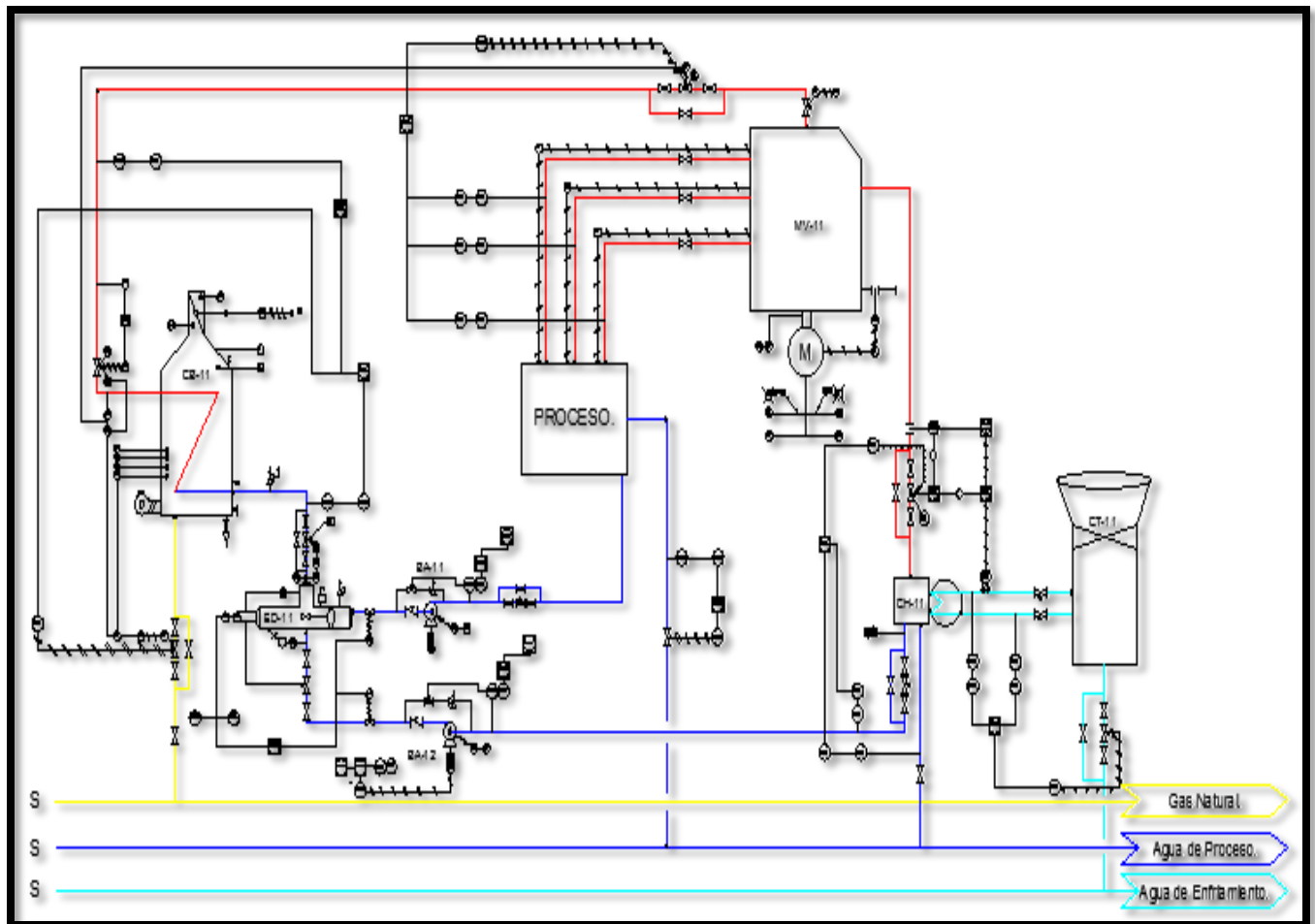


FIGURA 4. 12 Diagrama de flujo de proceso de cogeneración.

En la figura 4.12 se representa una planta de cogeneración que tiene una capacidad instalada de distribución eléctrica con CFE de 23 MW con una demanda variable de 18 a 20 MW. Una capacidad de generación eléctrica interna de 11.2 MW con una demanda variable de 7 a 8.5 MW y una capacidad instalada de generación de

vapor de 58 Kg/s (41.36854 bares). Las condiciones de extracción de vapor generadas para las corrientes de proceso son las siguientes:

La Corriente 2 genera 17.2 Kg/s (42 bares)

Corriente 3 genera 10 Kg/s (21 bares)

Corriente 4 genera 15.8 Kg/s (3.4 bares)

La turbina de vapor MV-11 es alimentada de la corriente 1, proveniente del generador de vapor CB-11 a presión de 50 bares y temperatura de 410°C. El generador de vapor CB-11 es alimentado por 3.9543 Kg/s de gas natural por ser un combustible relativamente limpio, por éste motivo se considera como una opción para aplicar directamente a procesos de secado, o puede ser aprovechado para procesos de combustión, ya que tienen un contenido de oxígeno alrededor del 15%; éste combustible alcanza una rango de temperaturas que van desde 500 hasta 650°C, temperaturas que son ampliamente utilizadas en el sector industrial. Las corrientes de vapor que salen de la turbina MV-11 son las corrientes 2, 3 y 4 mencionadas anteriormente que pasan al proceso de secado y el vapor de baja presión que sale de la turbina MV-11 (corriente 5) se introduce en un condensador CH-11, equipo donde el vapor condensa y cambia al estado líquido a presión de 0.0627 bar y 37°C; Posteriormente por la corriente 6, una bomba BA-12 se encarga de aumentar la presión del fluido en fase líquida por la corriente 7 a las condiciones de 50 bares y 87.6388 °C y alimentar al deareador e introducirlo nuevamente al generador de vapor CB-11 por la corriente 8 a 50 bares y 110 °C , cerrando de esta manera el ciclo.

4.6 Trigeneración.²²

Trigeneración o Trigen es la producción simultánea de energía mecánica o electricidad, el calor y refrigeración a partir de una sola fuente de calor, como el combustible o la energía solar.²²

La Trigeneración aprovecha el calor que desprende los ciclos en refrigeración para aportar calor que también se obtiene de la producción de electricidad. Por lo general, calefacción y agua caliente se almacenan en depósitos de almacenamiento que luego se usarán para el consumo. En verano, la demanda de calor es mucho menor, pero el calor del proceso de generación eléctrica se puede transformar en energía de refrigeración por una máquina de absorción. Aunque este tipo de máquinas necesitan desarrollarse todavía en un futuro la trigeneración podría englobar el enfriamiento por absorción, la calefacción y la generación de energía.²³

Una instalación de trigeneración se compone fundamentalmente de dos conjuntos tecnológicos: un módulo de cogeneración y la planta de refrigeración.

El módulo de cogeneración está definido por el sistema que transforma la fuente de energía primaria en electricidad y calor. La parte fundamental, por tanto, es el motor térmico que produce la energía eléctrica y térmica.

La planta de refrigeración también llamado sistema de producción de frío por absorción o de refrigeración por adsorción da lugar a la trigeneración. Los ciclos de absorción y de adsorción son procesos en los que se puede obtener frío a partir de una fuente de calor y son los más utilizados en instalaciones de trigeneración, aunque también pueden utilizarse ciclos convencionales de refrigeración por compresión. Este calor puede ser el calor residual del motor primario o provenir directamente de la transformación de la energía primaria.²²

En la época estival, la demanda de calor baja considerablemente, por lo que el calor producido en los equipos de cogeneración puede aprovecharse para generar frío para la refrigeración necesaria en esta época. La producción de frío supone un aumento de las horas de operación y del factor de utilización de las instalaciones respecto a las de cogeneración, permitiendo al sistema operar con una carga más estable a lo largo del año y favoreciendo su viabilidad económica. De esta forma se consigue a partir de una energía primaria tres tipos de energía, junto con un importante ahorro económico y una buena alternativa para el medio ambiente (figura 4.13).²²

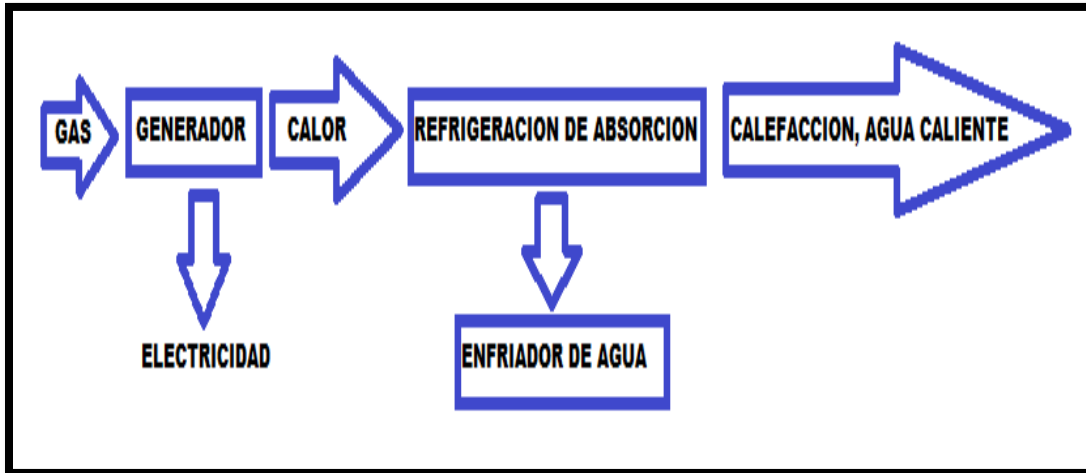


FIGURA 4. 13 Diagrama de trigeneración. Fuente: Juan Mata Sandoval, (7 de junio 2002). “Las energías renovables en la política de desarrollo energético sustentable”, Subsecretaría de Política Energética y Desarrollo Tecnológico. Guanajuato, México.

4.6.1 Los beneficios de un sistema de trigeneración.

1. Ahorros en costos de energía, uso de tri-generación para producir electricidad, y en particular cuando se usa gas para arrancar el generador y producir calor para la máquina de absorción en lugar de energía de la red para la instalación de aire acondicionado, el ahorro en costos de energía en el orden de hasta un 30% se puede lograr, en función de los precios relativos del gas y la electricidad en el sitio.
2. Ahorros en los gases de efecto invernadero, la producción de electricidad en el lugar utilizando gas produce aproximadamente un 30% menos de gases de efecto invernadero a continuación, utilizando el poder de la red en Nueva Gales del Sur para la misma cantidad de potencia de salida.
3. Energía de respaldo para el sitio. Una planta de trigeneración pueden asumir una parte sustancial del poder de un sitio y en el caso de un negro de salida pueden asumir una parte de las necesidades energéticas del sitio.
4. Independencia de la red, instalación de una planta de trigeneración ofrece un sitio con un nivel de independencia de la red eléctrica. En algunas áreas

de la capacidad de la red está limitado y en condiciones extremas puede necesitar la red de imponer restricción en uso.

5. Restricciones en la Red. En algunos sitios las limitaciones de la red pueden ser limitados o el costo para el usuario para actualizar la red tan alta que el uso del sitio está restringido. Una planta de trigeneración puede superar esta limitación.
6. Los costos de energía están subiendo, todo el mundo los costos de energía de la red va en aumento y será seguido aumentando en el futuro previsible. Una planta de tri-generación puede ser un amortiguador frente a algunos de estos aumentos en los costos de energía.

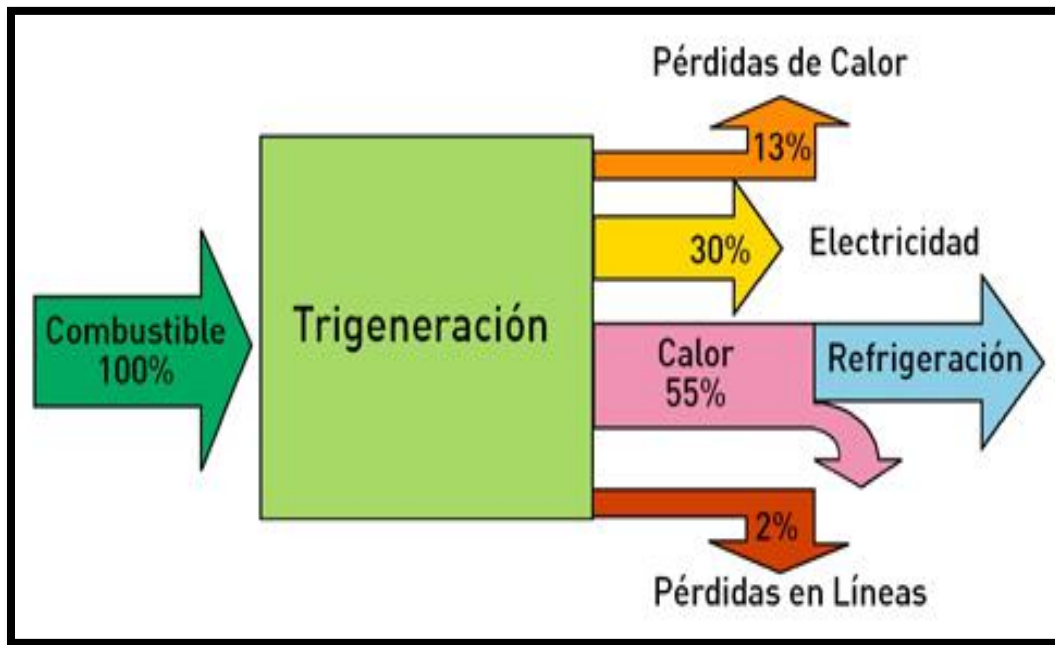


FIGURA 4. 14 Sistema de trigeneración. Fuente: Juan Mata Sandoval, (7 de junio 2002). "Las energías renovables en la política de desarrollo energético sustentable", Subsecretaría de Política Energética y Desarrollo Tecnológico. Guanajuato, México.

CAPITULO 5
HIDRÓGENO COMO
COMBUSTIBLE.

Capítulo 5 Hidrógeno como combustible.

En este trabajo el hidrógeno es el combustible a utilizar, por lo tanto se deben conocer sus principales propiedades, normas de seguridad y las formas para obtenerlo.

El hidrógeno es un combustible capaz de sustituir a los hidrocarburos y al uranio para obtener, particularmente, energía eléctrica. Además de ser sustentable, el hidrógeno tiene la ventaja fundamental de ser reciclable.

A diferencia de otros combustibles, el hidrógeno (H_2) se puede generar y consumir sin emitir bióxido de carbono (CO_2). Esto resulta en grandes ventajas ecológicas y retos fundamentales.²⁷

El hidrógeno puede operar en un ciclo cerrado e inagotable basado en las sustancias más limpias, abundantes y elementales: agua, oxígeno e hidrógeno. Si el hidrógeno se genera usando luz, calor y/o electricidad producidos a partir de energía solar, eólica o nuclear, el hidrógeno se convierte en un medio versátil y universal de almacenar y transportar energía, y un elemento necesario para futuros sistemas energéticos que operan sin contaminación ambiental, CO_2 , y otros gases que contribuyen al efecto de invernadero. El hidrógeno (figura 5.1) es necesario para eliminar la contaminación ambiental y estabilizar la composición de la atmósfera y el clima del planeta.²⁸



FIGURA 5. 1 Hidrógeno. Fuente: <http://blog.uchceu.es/ingenieria-energia/la-primera-central-de-hidrogeno-estara-en-almeria/>. (26 de Diciembre 2013).

5.1 Generalidades.

El Hidrógeno es el elemento más abundante del universo. Constituye el 90% de la masa del universo, es la más ligera e inmaterial de todas las formas de energía y la más eficiente cuando es quemada. Se encuentra tanto en el agua como en los combustibles fósiles y en todos los seres vivos.

El hidrógeno que hay en el agua y los organismos constituye el 70% de la superficie de la Tierra. Aunque, raramente se halla en estado libre y aislado, como sucede con el carbón, el petróleo y el gas natural; al quemarse sólo produce energía y agua, por lo que es el combustible más limpio que existe. Sin embargo, no se utiliza como tal, por el contrario tiene multiplicidad de usos no energéticos en la industria y se emplea de esta manera en grandes cantidades. El uso no energético de hidrógeno que se consume actualmente es alrededor de la quinta

parte del consumo actual de gas natural mundial y se le obtiene a partir de la reformación de hidrocarburos fósiles.²⁹

El hidrógeno es el elemento más simple conocido por el hombre. Un átomo de hidrógeno tiene únicamente un protón y un electrón. Normalmente existe como una molécula diatómica, es decir formada por átomos de hidrógeno, de ahí que el hidrógeno normalmente se exprese como H₂ tabla 5.1. Combinado con el oxígeno forma agua (H₂O). Combinado con el carbono puede formar distintos componentes como el metano (CH₄), el carbón o el petróleo.²⁹

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Nombre: Hidrógeno	Símbolo: H
Número atómico: 1	Masa atómica (uma): 1,00794
Período: 1	Grupo: 1
Bloque: s (representativo)	Número de oxidación: +1, -1

TABLA 5. 1 Características generales.

5.2 Propiedades del hidrógeno.

El hidrógeno es una mezcla en equilibrio de orto-hidrógeno y para-hidrógeno cuya diferencia radica en la distinta rotación relativa del spin atómico. Las moléculas con los spins (Número cuántico que indica el giro del electrón) en la misma dirección (paralelos) se denominan orto-hidrógeno; y aquellas con los spins en direcciones opuestas (antiparalelas) se denominan, para-hidrógeno. A medida que la temperatura disminuye las moléculas de orto-hidrógeno se convierten en para-hidrógeno. En la licuación del hidrógeno será muy importante tener en cuenta esta propiedad. Estas moléculas tienen pequeñas diferencias en las propiedades físicas pero son químicamente equivalentes; por lo tanto, los riesgos asociados

con el uso del hidrógeno son los mismos para las dos formas moleculares, tabla 5.2.²⁸

PROPIEDADES PERIÓDICAS	
Configuración electrónica: 1s¹	Radio atómico (Å): 0,25
Radio iónico (Å): 2,08 (-1)	Radio covalente (Å): 0,37
Energía de ionización (kJ/mol): 1315	Electronegatividad: 2,1
Afinidad electrónica (kJ/mol): 73	

TABLA 5. 2 Propiedades periódicas.

El hidrógeno es el más ligero de los combustibles. Además, ofrece la mayor densidad de energía por unidad de masa entre todos los posibles combustibles. Por el contrario, el hidrógeno presenta una baja densidad de energía por unidad de volumen, tal y como se aprecia en la siguiente tabla 5.3.²⁸

COMBUSTIBLE (T=20°C,P=1ATM)	DENSIDAD DE ENERGÍA POR UNIDAD DE MASA (MJ/KG)
Hidrógeno	120
Gas Natural (Metano)	50
Metanol	20
Gasolina	43

TABLA 5. 3 Energía por unidad de volumen.

El hidrógeno es también altamente difusivo, lo que implica su rápida disipación en el ambiente. Su mayor desventaja es que tiene la más baja densidad de almacenamiento de entre todos los combustibles, requiriendo un gran volumen para su almacenamiento ya sea en forma líquida o gaseosa. El bajo punto de

ebullición del hidrógeno significa también que los sistemas de almacenamiento líquido deben estar bien aislados para evitar su evaporación.²⁸

5.2.1 Propiedades físicas.

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido a temperatura ambiente. Es el elemento más liviano que existe, siendo aproximadamente 14 veces menos pesadas que el aire. Su molécula consiste de dos átomos de hidrógeno (H₂) unidos por un enlace covalente. Posee tres isótopos, de los cuales el más abundante es el Protio (99.985%); el Deuterio tiene una abundancia de 0,02% y el tritio es tan escaso que de cada 109 átomos de hidrógeno hay uno de tritio.

El hidrogeno es fácilmente absorbido por ciertos metales finamente divididos, siendo los principales paladio, platino y oro.²⁸

5.2.2 Propiedades químicas.

Químicamente, el hidrógeno es capaz de combinarse con la mayoría de los elementos cuando se tienen las condiciones adecuadas. El hidrógeno tiene gran afinidad con el oxígeno, con el cual se combina en frío muy lentamente, pero en presencia de una llama o de una chispa eléctrica lo hace casi instantáneamente con explosión. Por esto, las mezclas de hidrógeno y aire deben manejarse con mucha precaución. La reacción es:



Esta reacción desprende gran cantidad de energía. Una propiedad muy importante del hidrógeno es su poder reductor. En efecto, a altas temperatura el hidrógeno reacciona con algunos óxidos reduciéndolos.

Este poder reductor, que se base en la tendencia del hidrógeno a oxidarse al estado de oxidación +1, tiene además aplicación en muchos procesos químicos (tabla 5.5).²⁸

Propiedad	Valor
Masa molecular	2.01594 kg/kgmol
Densidad de gas a 0 °C y 1 atm	0.08987 kg/m ³
Densidad de sólido a -259 °C	858 kg/m ³
Densidad de líquido a -253 °C	708 kg/m ³
Temperatura de fusión	-259 °C
Temperatura de ebullición a 1 atm	-253 °C
Temperatura crítica	-240 °C
Presión crítica	12.8 atm (1,296.96 kPa)
Densidad en el punto crítico	31.2 kg/m ³
Calor de fusión a -259 °C	58 kJ/kg
Calor de vaporización a -253 °C	447 kJ/kg
Conductividad térmica a 25 °C	0.019 kJ/(ms°C)
Viscosidad a 25 °C	0.00892 centipoise
Capacidad calorífica (Cp) de gas a 25 °C	14.3 kJ/kg°C
Capacidad calorífica (Cp) de líquido a -256 °C	8.1 kJ/kg°C
Capacidad calorífica (Cp) de sólido a -259.8 °C	2.63 kJ/kg°C
Poder calorífico inferior	120,000 kJ/kg
Volumen atómico	14.24 cm ³ /mol
Color	Incoloro

TABLA 5. 4 Propiedades del hidrógeno.

5.3 Normas de seguridad para el hidrógeno.

Normas de seguridad en el manejo, almacenamiento y uso de gases y cilindros del hidrógeno comprimido.²⁸

1. NORMAS DE LIMPIEZA

- No permita el contacto del cilindro con aceites, grasas, u otras sustancias combustibles, para evitar mezclas que puedan producir peligrosas explosiones.
- No lubrique las válvulas de los cilindros, reguladores y manómetros con aceite u otras sustancias combustibles.
- No repinte el cilindro ni pinte marcas en ellos.

2. NORMAS DE TRANSPORTE

- Los cilindros deben ser transportados y almacenados con la tapadera protectora.
- Utilice carretilla para transportar los cilindros.
- No transporte cilindros dentro de la cabina del vehículo, si por emergencia tiene que hacerlo, hágalo con las ventanas abiertas y no fume.
- Mueva los cilindros con cuidado, no los golpee cuando sean cargados o descargados de los vehículos de transporte.
- No suspenda los cilindros colgándolos de la tapa protectora.

3. NORMAS EN EL USO

- Para conectar el regulador u otro accesorio, utilice llaves fijas de la medida exacta. No utilice llaves regulables que puedan resbalar y provocar chispas.
- Retorne los cilindros vacíos con 25 psig de presión para evitar contaminaciones.
- No apriete con excesiva fuerza las conexiones de los cilindros, el bronce es blando y se ajusta con mucha facilidad.
- No fume ni provoque chispas donde se está usando oxígeno o cualquier gas inflamable, como el acetileno.

4. NORMAS DE ALMACENAMIENTO

- Nunca deje los cilindros bajo el sol o a la intemperie, estos deben ser almacenados en un lugar fresco, seco y bien ventilado.

- No almacene los cilindros en sitios donde puedan convertirse en parte de un circuito eléctrico.
- Asegure los cilindros a una estructura sólida para evitar que se caigan.

5. NORMAS GENERALES

- Para detectar fugas de gas, utilice soluciones como agua jabonosa, nunca pruebe fugas acercando una llama.
- Cada cilindro está diseñado para un gas específico, no haga trasiegos de un cilindro a otro.

En México no se han desarrollado normas en materia de hidrógeno y no se ha oficializado el uso de ninguna norma internacional, sin embargo en la práctica, las empresas que manejan hidrógeno en México utilizan normas internacionales.

Las normas dictan los lineamientos a seguir para el diseño y construcción de instalaciones seguras. Actualmente, el Comité de Hidrógeno de ISO trabaja con el fin de desarrollar normas referentes a sistemas y dispositivos de producción, almacenaje, transporte, medida y manejo del hidrógeno. Este comité es reconocido mundialmente como una entidad responsable del desarrollo de normas, códigos y guías generales en el campo de las tecnologías del hidrógeno.⁸³

ISO/DIS 13985.3 Hidrógeno líquido. Tanques para vehículos terrestres.

ISO/CD 13986 Tanques de transporte multimodal para hidrógeno líquido.

ISO/DIS 17268 Hidrógeno gaseoso. Conectores para carga de combustible para vehículos terrestres.

ISO/DIS 15869. 1/2/3/4/5 Hidrógeno gaseoso y mezclas. Tanques de combustible para vehículos terrestres.

ISO/WD 20012 Hidrógeno gaseoso. Estaciones de abastecimiento.


ISO/CD 16110.1/2 Generadores de hidrógeno usando tecnologías de procesamiento de combustible.

ISO/CD 22734 Generadores de hidrógeno que emplean procesos de electrólisis del agua.

ISO/WD 16111 Dispositivos transportables para almacenamientos de gas. Absorción reversible de hidrógeno en hidruros metálicos.

ISO/14687:1999/ AWI Amd.1 Hidrógeno combustible. Especificación del producto.

5.4 Hoja de seguridad del hidrógeno.²⁸

HOJA DE SEGURIDAD DEL MATERIAL HIDROGENO	
PRODUCTO: Hidrógeno CAS 133-74-0 DOT. N° UN 1049 Ficha de intervención: N° 0	
	
NOMBRE COMERCIAL Y SINONIMOS Hidrógeno comprimido, Gas de agua, Hidrógeno Normal	Clase de riesgo: División 2.1
NOMENCLATURA QUIMICA Y SINONIMOS Hidrógeno	Fórmula: H_2
FECHA DE EMISION Y REVISIONES Revisado en Marzo de 1991	Familia Química: Gas inorgánico inflamable
INFORME SOBRE RIESGO PARA LA SALUD	
CONCENTRACIÓN MÁXIMA PERMISIBLE PONDERADA EN EL TIEMPO (CMP-CPT): El hidrógeno esta definido como un asfixiante simple. "F". El contenido mínimo de oxígeno debe ser del 18% molar, a presión atmosférica normal equivalente a una presión parcial de ($pO_2 > 135$ torr.) (ACGIH 1990 - 1991) OSHA 1989 no tiene listado el TWA. Ley 19587 Dec. Reg. 351/79 Anexo III Cap. 9 Art. 61 "Contaminación Ambiental".	

SINTOMAS DE EXPOSICIÓN:

Altas concentraciones de hidrógeno de modo tal que impidan un adecuado suministro de oxígeno a los pulmones causa mareos, respiración profunda debido a la falta de aire, posibles náuseas y eventual pérdida de conocimiento.

CARACTERÍSTICAS TÓXICAS:

El hidrógeno es inactivo biológicamente y principalmente no tóxico, de esta manera su principal propiedad es la de impedir un adecuado suministro de oxígeno a los pulmones.

El hidrógeno no está listado en el IARC, NTP, o por OSHA como carcinogénico o potencial carcinogénico.

Las personas enfermas, cuya afección podría verse agravada, por la exposición al hidrógeno no deben ser autorizadas a trabajar o manipular este producto.

TRATAMIENTO DE PRIMEROS AUXILIOS - RECOMENDACIONES

UNA RÁPIDA ATENCIÓN MÉDICA ES OBLIGATORIA EN TODOS LOS CASOS DE SOBRE EXPOSICIÓN AL HIDROGENO. EL PERSONAL DE RESCATE DEBE ESTAR EQUIPADO CON EQUIPOS DE RESPIRACIÓN AUTÓNOMA Y RECONOCER LOS RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSION.

Inhalación: Si la persona está consciente, deberá ser trasladada fuera del área contaminada para inhalar aire fresco. Retirla rápido, del área contaminada es lo más importante. Si la víctima estuviera inconsciente, se le deberá trasladar a un área descontaminada, brindar ayuda respiratoria y suplemento de oxígeno. El tratamiento posterior será de soporte y continuará según los síntomas.

MEZCLAS PELIGROSAS CON OTROS LIQUIDOS, SOLIDOS O GASES

Forma mezclas explosivas o inflamables con la mayoría de los oxidantes, (oxígeno, cloro, flúor etc.)

Es inflamable en aire, en un amplio rango.

DATOS FÍSICOS**PUNTO DE EBULLICIÓN:**

-423 °F (- 252.8 °C)

DENSIDAD LIQUIDA EN EL PUNTO DE EBULLICIÓN

4.43 lb/ft³ | 70.96 kg/m³ }

PROCEDIMIENTOS ESPECIALES PARA COMBATIR EL FUEGO

Si es posible, detenga el flujo de metano. Emplee niebla de agua, para enfriar los cilindros que se encontraren en las proximidades. El hidrógeno quema con una llama casi invisible de radiación térmica relativamente baja

RIESGOS INUSUALES DE FUEGO Y EXPLOSIÓN

El hidrógeno es muy liviano y se difunde muy rápidamente en el aire. Si al extinguirse la llama, el flujo de gas continúa, aumentar la ventilación para prevenir el peligro de explosión, particularmente en las partes superiores de los edificios o cobertizos donde el gas podría "acumularse".

INFORMACION SOBRE REACTIVIDAD

ESTABILIDAD	CONDICIONES QUE SE DEBEN EVITAR	
Inestable	---	
Estable	X	N/A
INCOMPATIBILIDAD (MATERIALES QUE SE DEBEN EVITAR)		
Oxidantes		
PRODUCTOS DE DESCOMPOSICIÓN RIESGOSA		
Ninguna		
POLIMERIZACIÓN RIESGOSA	CONDICIONES QUE SE DEBEN EVITAR	
Puede Ocurrir ----	N/A	
No puede Ocurrir X		

PROCEDIMIENTOS EN CASO DE DERRAMES O PERDIDAS**MEDIDAS A TOMAR EN CASO QUE SE PRODUZCAN DERRAMES O PERDIDAS**

Evacuar al personal que se encuentre dentro del área afectada. Utilizar equipos de protección adecuados. Si la pérdida se produjera en el equipo del usuario, se deberá efectuar el purgado de la cañería con un gas inerte, antes de intentar reparaciones. Si la pérdida se encontrara en la válvula del container o del cilindro, contactar a su proveedor más cercano o telefonar al Departamento Técnico de AGA.

PROCEDIMIENTO PARA ELIMINAR PRODUCTO RESIDUAL:

No intente eliminar el producto residual o remanente de uso. Devuélvalos al proveedor dentro de su container o cilindro de carga adecuadamente etiquetados, con los cierres de las válvulas de salida bien asegurados y las tapas de protección de válvulas colocadas en su lugar. En caso de ayuda, para eliminación de producto residual de emergencia, contacte a su proveedor más cercano o llame al Departamento técnico de AGA S.A.

INFORMACIÓN SOBRE PROTECCIÓN ESPECIAL

PROTECCION RESPIRATORIA: Para casos de emergencia debe hallarse una línea de presión positiva de aire con máscara, o equipo de respiración autónoma

VENTILACIÓN Campana de ventilación forzada	VENTEO DEL LOCAL: Para prevenir la acumulación encima del LEL MECANICA: Conforme a los códigos de electricidad
--	---

GUANTES DE PROTECCIÓN: Plástico o goma

PROTECCIÓN OCULAR: Anteojos de seguridad o antiparras

OTROS MATERIALES DE PROTECCIÓN: Zapatos de seguridad, ducha de seguridad, lava ojos.

PRECAUCIONES ESPECIALES

ETIQUETADO:

Nombre: Hidrógeno, comprimido Clase de Riesgo DOT : División 2.1

Etiqueta de embarque: Gas inflamable I.D. N° : UN: 1049

ALMACENAJE:

Proteger los cilindros de cualquier daño físico. Almacenar en un área fresca, seca, bien ventilada, lejos de los lugares de tráfico vehicular y de las salidas de emergencia. No permitir, que en el lugar de almacenaje la temperatura exceda 125°F (52°C). Los cilindros serán colocados parados y bien asegurados para evitar que se caigan o se golpeen. Se deben separar los cilindros llenos de los vacíos. Utilizar un sistema de inventario con fecha de ingreso y egreso de las unidades para evitar que cilindros llenos queden almacenados durante períodos excesivamente largos.

Coloque carteles en el área de almacenaje con la leyenda NO FUMAR o el símbolo de LLAMAS ABIERTAS.

No deben encontrarse fuentes de ignición en el área de almacenaje o uso.

Para información adicional sobre recomendaciones de almacenaje, consulte los boletines de Compressed Gas Association P-1, P-14, G-5 y Safety Bulletin SB-2.

MANIPULEO:

Utilizar solamente en áreas muy bien ventiladas. Las tapas protectoras de las válvulas deben estar colocadas, a menos que el cilindro posea caño de salida desde la válvula al punto de uso. No arrastrar, deslizar o hacer rodar los cilindros, sino utilizar autoelevadores o zorras para desplazarlos. Utilizar un regulador reductor de presión cuando se conectan los cilindros a una presión menor (< 3000 psig) cañerías o sistemas. De ninguna manera se deben calentar los cilindros para incrementar su velocidad de descarga. Utilizar una válvula de control o de retención para evitar riesgos de retroceso de flujo al interior del cilindro.

Para información adicional sobre recomendaciones de manipuleo, consulte el boletín de la Compressed Gas Association's P-1, P-14, G-5 y Safety Bulletin SB-2

ENVASADO:

El hidrógeno es no corrosivo y puede utilizarse con cualquier material de construcción.

OTRAS RECOMENDACIONES O PRECAUCIONES:

- Todos los equipos y líneas relacionados con el sistema de hidrógeno deben estar conectados a tierra.
- El equipo eléctrico debe ser antichispa o a prueba de explosión.
- Los cilindros de gas comprimido no deben ser recargados, excepto por fabricantes calificados de gases comprimidos. La carga de cilindros de gas comprimido debe ser efectuada por el fabricante o bien se debe contar con su consentimiento escrito para poder realizarla, caso contrario, constituye una violación a las leyes vigentes.
- Asegurarse siempre que los cilindros se encuentren en posición vertical antes de transportarlos. **NUNCA** transporte cilindros en baúles de vehículos, compartimientos cerrados, cabinas de camiones o en compartimientos de pasajeros.

Transporte los cilindros asegurados en plataformas o en vehículos abiertos tipo pick up.

5.5 Producción del hidrógeno.²⁹

En esta sección se explicarán las formas de generar el hidrógeno mediante energías renovables y se hace el planteamiento de ingeniería conceptual de cómo obtener hidrógeno para alimentar un generador de vapor para poder llevar a cabo el ciclo de potencia Rankine.

El hidrógeno como portador de energía, o vector energético, representa una alternativa a medio plazo muy seria a los combustibles fósiles. Esto se debe a que la energía almacenada en el hidrógeno puede fácilmente convertirse en electricidad con una gran eficiencia 60 – 65 %.²⁹

En el ciclo del hidrógeno, éste juega el papel de intermediario entre las energías renovables como la solar, eólica, biomasa, etcétera; la posibilidad de almacenar hidrógeno de manera relativamente fácil vendrá a suplir una de las principales limitaciones de la energía solar y eólica e incluso de la energía eléctrica.²⁹

La utilización masiva de hidrógeno estará asociada a una reducción drástica en los costos de su producción.

Para garantizar un prolongado desarrollo sostenible, en su obtención, no pueden consumirse combustibles fósiles para su obtención.

El hidrógeno como portador de energía, o vector energético, representa una alternativa al uso de combustibles fósiles.

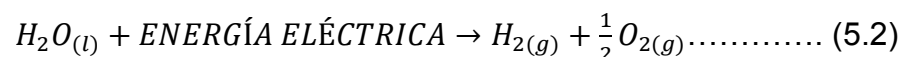
Esto se debe a que la energía almacenada en el hidrógeno puede fácilmente convertirse en electricidad con una gran eficiencia (60 – 65 % en pilas de combustible tipo MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell o celdas de combustible de carbonato fundido) y SOFC (Solid-Oxide Fuel Cell o celdas de combustible de óxido sólido) mediante la utilización de pilas de combustible.²⁹

Alrededor del 48% de la producción del hidrógeno en la actualidad está basado en el reformado de metano mediante vapor (SMR), el 30% procede del reformado del petróleo/nafta en refinerías e industrias químicas, un 18% procede de procesos de gasificación de carbón, un 3.9% de la electrólisis del agua y un 0,1% de otras fuentes.²⁹

5.5.1 Electrólisis.

La historia de la electrólisis comienza tempranamente durante la primera revolución industrial cuando, en el año 1800, Nicholson y Carlisle descubren el proceso de separación electrolítica de la molécula de agua.³⁰

En la actualidad, la electrólisis del agua es una tecnología bien conocida, es el proceso que separa los elementos de un compuesto por medio de la electricidad. Ocurre en el cátodo una reducción (la captura de electrones por los cationes) y una oxidación en el ánodo (liberación de aniones en el ánodo). La reacción total para la separación del agua es la siguiente (5.2).³⁰

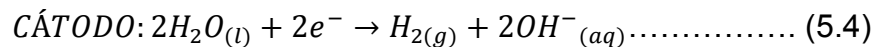
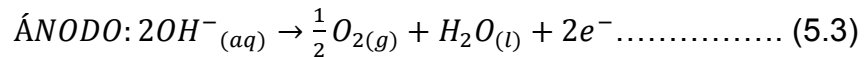


Para que esta reacción ocurra, debe ser aplicado sobre los electrodos un cierto voltaje, el cual puede ser determinado mediante la energía libre de Gibbs para la ruptura de la molécula de agua. Existen 3 tipos de electrolizadores que son: ³⁰

- **Electrólisis de óxido sólido:** Los sistemas de óxido sólido fueron diseñados para operar a altas temperaturas. En un diseño temprano, estos fueron electrodos tubulares dentro de los cuales fluía la corriente de agua. La ventaja de este tipo de sistema es la habilidad de sustituir parte de la energía eléctrica requerida para separar agua en energía térmica. En estos dispositivos, varias celdas circulares (tipo anillos) son conectadas una tras otra de manera de formar un tubo. El vapor de agua es alimentado al tubo y es reducido en el cátodo construido de acero y níquel (parte interior del tubo) formando hidrógeno, el cual es retirado por el extremo contrario al cual ingresa el agua. Los iones de oxígeno migran a través del conductor de óxido sólido construido de y trio estabilizado en óxido de zirconio y es oxidado en la parte exterior del tubo. Es conveniente notar que los iones de oxígeno migran hacia el exterior a través de las paredes del dispositivo las cuales son permeables a este ión. ³⁸
- **Electrólisis con dispositivo de electrolito de membrana polimérica (PEM):** En electrolizadores de membrana, se utiliza una membrana polimérica para el intercambio de protones entre los electrodos. Puede ser utilizada solo agua pura en estos electrolizadores la cual ingresa directamente sobre el ánodo del equipo, donde la molécula es separada en oxígeno y las partículas subatómicas con carga positiva (ion hidrógeno), estas últimas viajan a través de la membrana hacia el cátodo donde se produce hidrógeno. Este sistema sofisticado de electrólisis de agua permite altas densidades de corriente manteniendo altas eficiencias de producción y sería probablemente el mejor método para producir hidrógeno electroquímicamente si no fuera por el gran inconveniente que representa los altos costos de producción de la membrana polimérica. Otro aspecto de

relevancia es la necesidad de utilizar metales nobles en los electrodos, lo que hace aún más costosa la inversión en estos equipos.³⁸

- **Electrólisis alcalina:** En la electrólisis alcalina el electrolito es generalmente hidróxido de potasio (KOH) en una solución acuosa al 20-30%, en donde los iones K⁺ e hidroxilo (OH⁻) son causantes de las corrientes iónicas. Las reacciones anódicas y catódicas son las siguientes:³⁸



5.5.1.1 Electrólisis alcalina.³³

La electrólisis del agua es la descomposición de agua (H₂O) en los gases oxígeno (O₂) e hidrógeno (H₂) por medio de una corriente eléctrica a través del agua. Una fuente de energía eléctrica se conecta a dos electrodos (hechos de algún metales como: el platino, el acero inoxidable o acero al carbón). En una solución alcalina, los electrodos deben ser resistentes a la corrosión y deben tener excelentes conductividad eléctrica además de propiedades catalíticas. Por otra parte, el diafragma debe tener una baja resistencia eléctrica.

Todas estas propiedades pueden ser alcanzadas utilizando ánodos de Níquel (Ni), Cobalto (Co) o Hierro (Fe) y cátodos de Níquel con platino promovido por carbón activado (Ni, C-Pt). El diafragma comúnmente es de óxido de Níquel (NiO).

Las condiciones de operación típicas de este tipo de electrolizadores varían generalmente entre los 70-100 °C. y 1-30 bar., respectivamente. Físicamente un electrolizador consiste en varias celdas ordenadas en serie.⁴⁰

Existen dos diseños distintos para este tipo de electrolizadores:

- Electrolizador monopolar o unipolar.
- Electrolizador bipolar

Los electrodos están situados en dos regiones separadas por el diafragma, mientras que los cátodos son puestos en el agua (H₂O) estando refrigeradas porque así se disipa el calor generado. El electrolito está formado por una disolución de KOH a concentración próxima del 40% trabajando a una temperatura del orden de 80°C (figura 5.2).

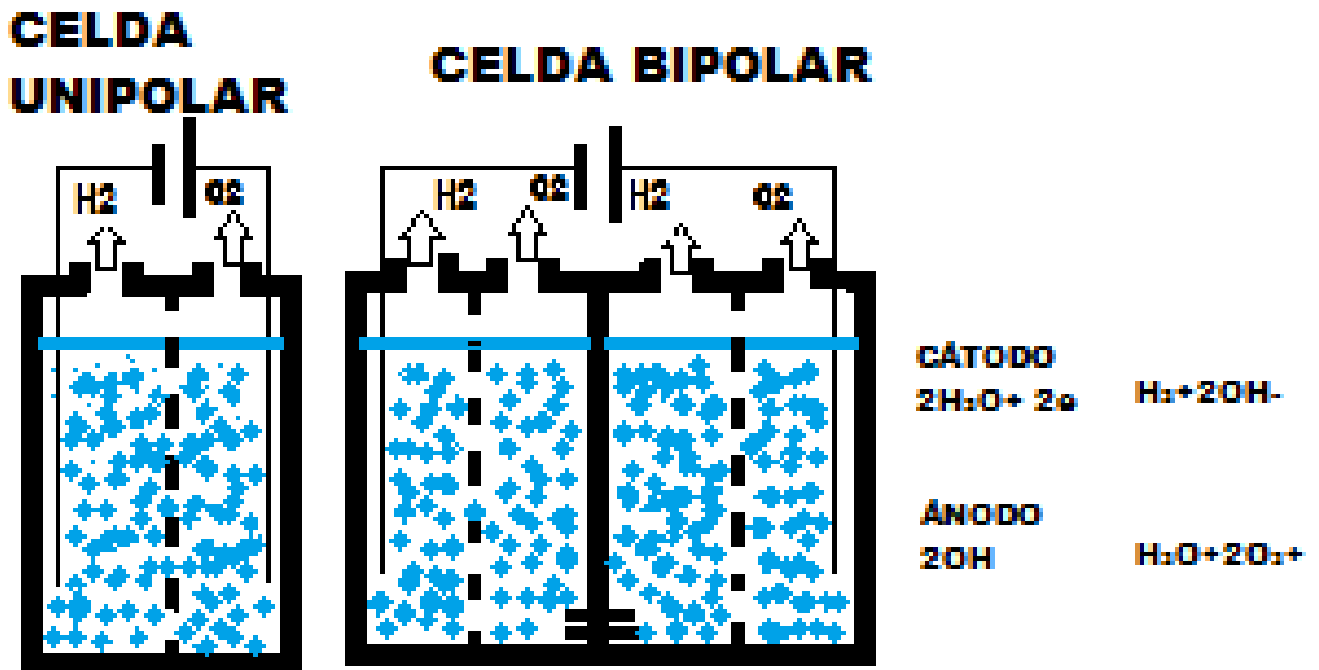


FIGURA 5. 2 Tipo de electrolizadores. Fuente: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, “El gas natural y el hidrógeno en automoción”, (11 de marzo 2003), Madrid.

En las celdas bipolares se conectan dos de ellas en serie a través de un separador de níquel, el cual hace en una celda de ánodo y en la contigua de cátodo, con lo que se consigue una importante reducción en el volumen del aparato. En la celda, el hidrógeno aparecerá en el cátodo (el electrodo negativamente cargada, donde los electrones son bombeados al agua), y el oxígeno aparece en el ánodo (el electrodo positivamente cargado), y el hidrógeno generado es el doble que el de oxígeno, ambos son proporcionales al total de carga eléctrica que fue enviada por el agua. Sin embargo, en varias celdas las reacciones del lado competidor dominan, resultando en diferentes productos.³³

Si la electricidad consumida es de origen renovable, no se producen emisiones a la atmósfera. El proceso es no contaminante y el hidrógeno producido es de gran

pureza. Generalmente la eficiencia es sólo de alrededor del 60 – 65% debido a que las burbujas del gas producido en los electrodos dificulta el movimiento de los iones, pero puede aumentar hasta cerca del 80% si se utilizan electrodos porosos apropiados.

Actualmente se utilizan tres tipos de electrolizadores a nivel industrial. Dos de ellos utilizan una disolución de hidróxido potásico (KOH) debido a su alta conductividad, y son denominados electrolizadores alcalinos (unipolares o bipolares). El tercer tipo es el electrolizador de electrolito de polímero sólido, que representa la tecnología más novedosa actualmente, contando con las ventajas de que no utiliza electrolito líquido y que no implica el manejo de disoluciones corrosivas, al contrario que en el caso del KOH, aunque tiene el inconveniente del corto tiempo de vida de su membrana. Los requerimientos de calidad del agua varían en función del tipo de electrolizador que se utiliza, aunque los purificadores son esenciales para garantizar la calidad del agua.³⁹

Una estrategia interesante para disminuir el consumo de electricidad en la electrólisis se basa en reemplazar parte de la energía eléctrica por energía térmica llevando a cabo la descomposición del agua a temperaturas elevadas. En efecto, el cambio de energía libre asociada con la reacción electroquímica viene dada, en función de los cambios de entalpía y de entropía, por la ecuación (5.5);

$$G = H - T S = n F V \dots\dots\dots (5.5)$$

Donde F es la constante de Faraday, n es el número de moles y V es el potencial eléctrico, el cual será tanto menor cuanto mayor sea la temperatura.

5.6 Planta de electrólisis para la obtención del hidrógeno.⁴²

La producción de hidrógeno se realiza en instalaciones centralizadas debido a su eficiencia, la cual oscila entre 5 y 10 puntos porcentuales por encima de la que se obtiene en instalaciones descentralizadas, sin embargo al implementar energías renovables en estas últimas se incrementa la producción del hidrogeno y así se suprimen los costos de transporte y almacenamiento utilizados en las instalaciones centralizadas.⁴²

Una vez que se decidió diseñar el proceso mediante electrólisis alcalina, el arreglo que más se acomoda a los requerimientos es la electrólisis alcalina en electrolizador bipolar dada la reducción del tamaño de la planta (figura 5.3).

El proceso de electrólisis alcalina de agua cuenta con tres operaciones esenciales:

- Sistema de electrolizadores: En los cuales se lleva a cabo la operación de electrólisis de agua mediante la utilización de energía eléctrica.
- Sistema de compresión: Dado que se tiene una gran producción de gases hidrógeno y oxígeno, es necesario diseñar un sistema eficiente de almacenamiento de estos compuestos, de manera de ahorrar espacio, es necesario contar con un sistema de compresión de gases que permita aumentar la densidad de estos gases.
- Red de intercambiadores de calor: mediante una red de intercambio se lleva el reactivo principal (agua) y los productos a las temperaturas necesarias para los procesos de electrolisis, compresión y almacenamiento.

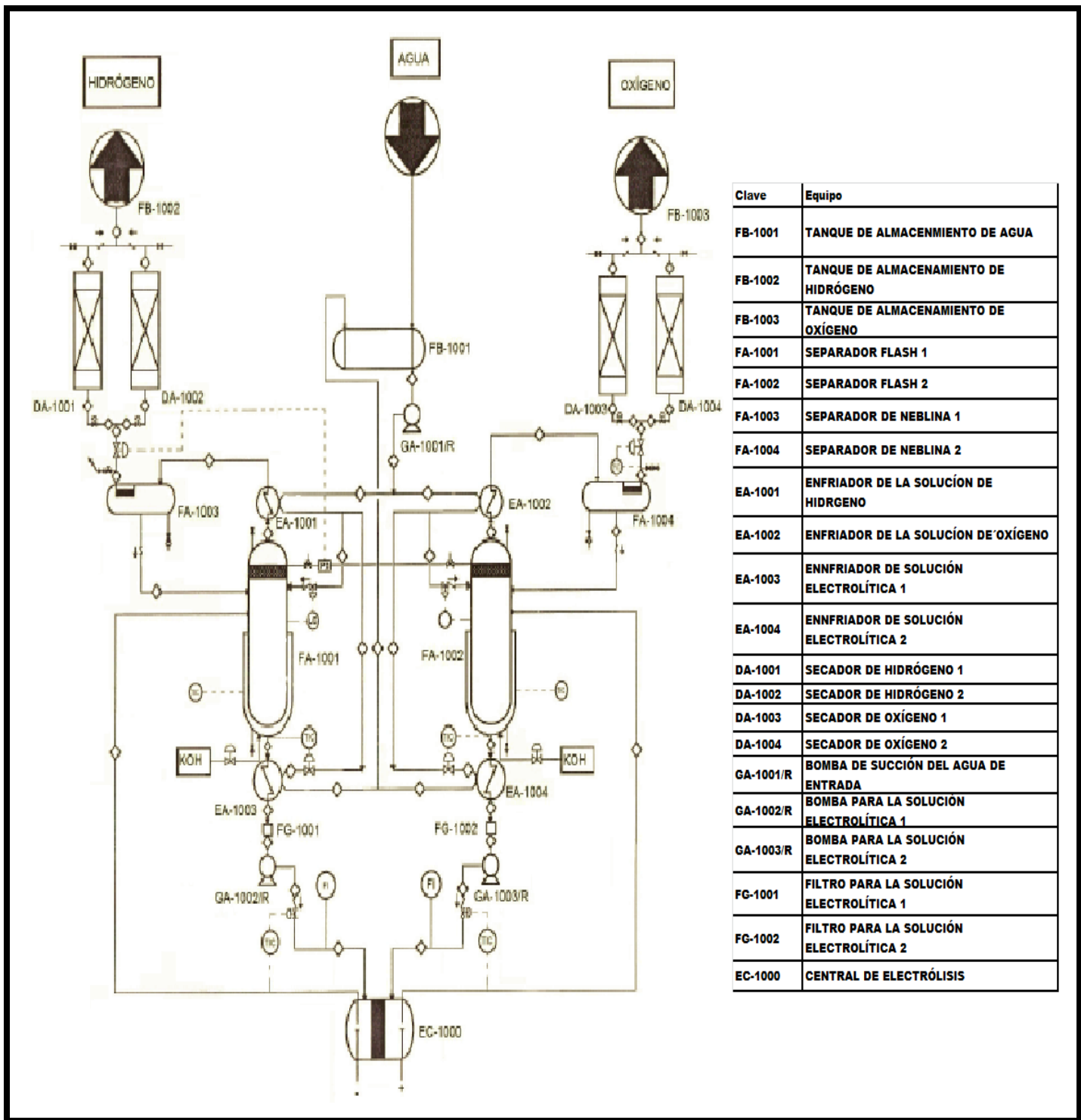


FIGURA 5. 3 Diagrama de tubería e instrumentación de la electrólisis alcalina. Fuente: Rafael Sánchez Dirzo, Rodolfo Silva-Casarin, Edgar G. Mendoza-Baldwin y Rosa de Guadalupe González-Huerta. "Hidrógeno del Mar". Facultad de Estudios Superiores Zaragoza Campus II UNAM. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, Volumen 15, No 1, 2012. Páginas 49 a 61.

5.6.1 Compresión.⁴⁴

Al comprimir un gas, este reduce su volumen de acuerdo al recipiente de almacenamiento, de este modo es posible almacenar una mayor cantidad de energía por unidad de volumen. Por eso es necesario comprimir el hidrógeno, el proceso de compresión permite utilizar eficientemente los volúmenes de almacenaje con que se cuenta, lo cual representa una ventaja, ya que se reduce el espacio necesario para el almacenamiento, aumentando a su vez la propiedad del gas en cuanto a su contenido energético lo cual da un valor agregado al producto y reduce costos de operación.⁴⁴

Existen compresores tipo estándar axial, radial y de pistón recíprocante, los empaques son el elemento más delicado debido a la fricción a la que son sometidos y a las propiedades ya mencionadas de dispersión del H₂. Los compresores de pistón recíprocante pueden ser de capacidades mayores a 11,200kW (15,000 hp) y pueden manipular flujos de 890 kg/h a presiones arriba de 25 MPa (3,600 psig). Son adecuados también para flujos variables ver figura (5.4).

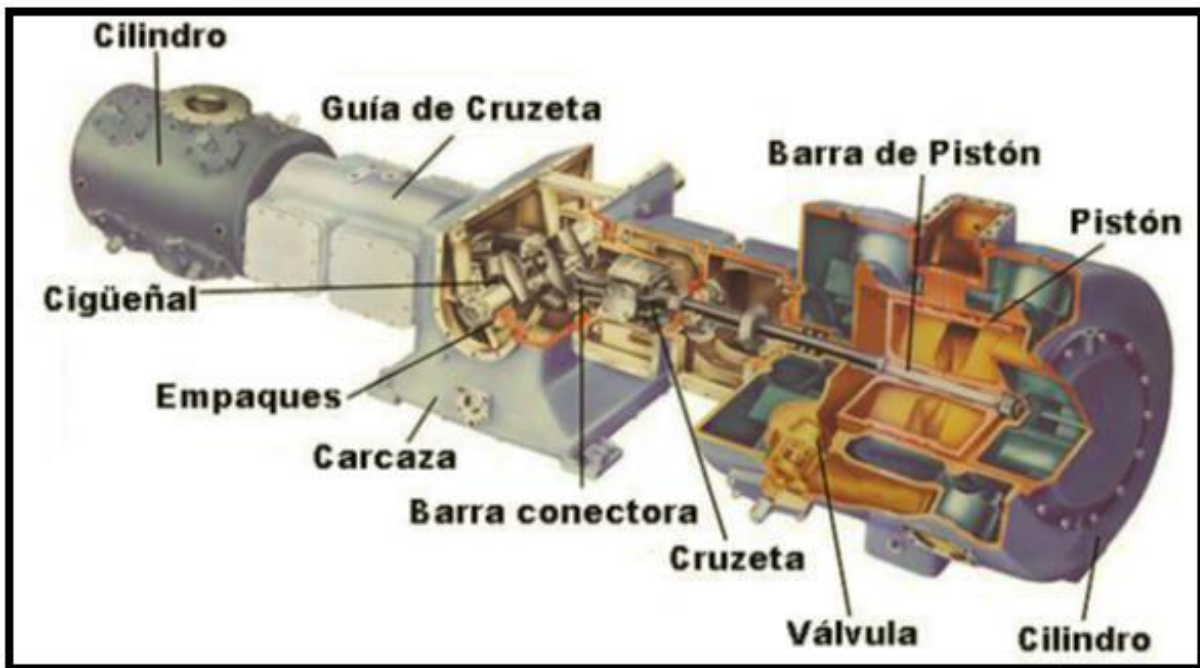


FIGURA 5. 4 Compresor de pistón recíprocante. Fuente: Modificado NORMARLK, 2005.

Los compresores radiales se utilizan para flujos de 160- 22,000 kg/h (figura 5.5).

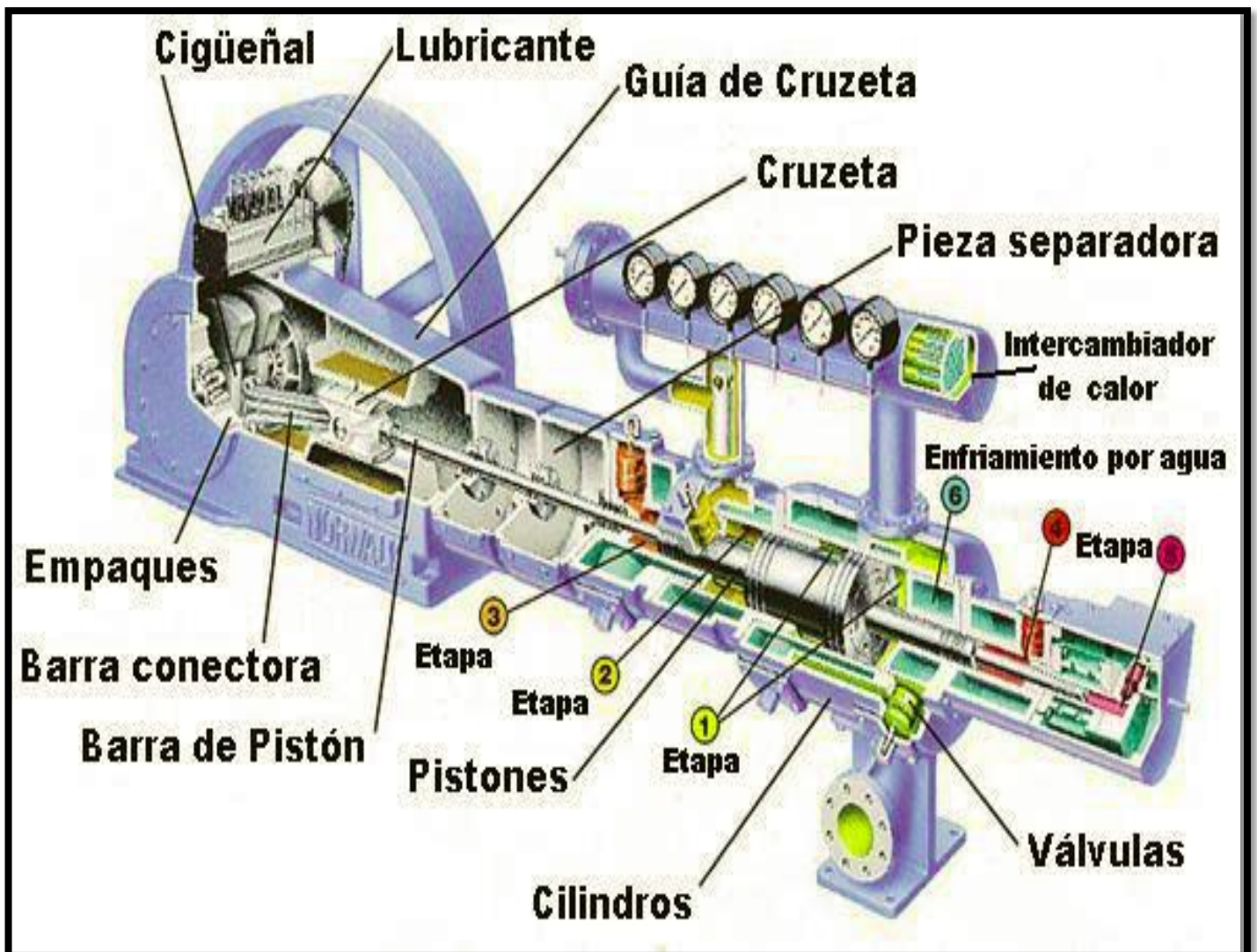


FIGURA 5.5 Compresor Radial. Fuente: Modificado NORMARLK, 2005.

Los compresores axiales se utilizan para 6,400-89,000 kg/h. Una ventaja de estos es que se pueden acoplar en una sola flecha mecánica, pero tienen eficiencias solo hasta del 50% (figura 5.6)

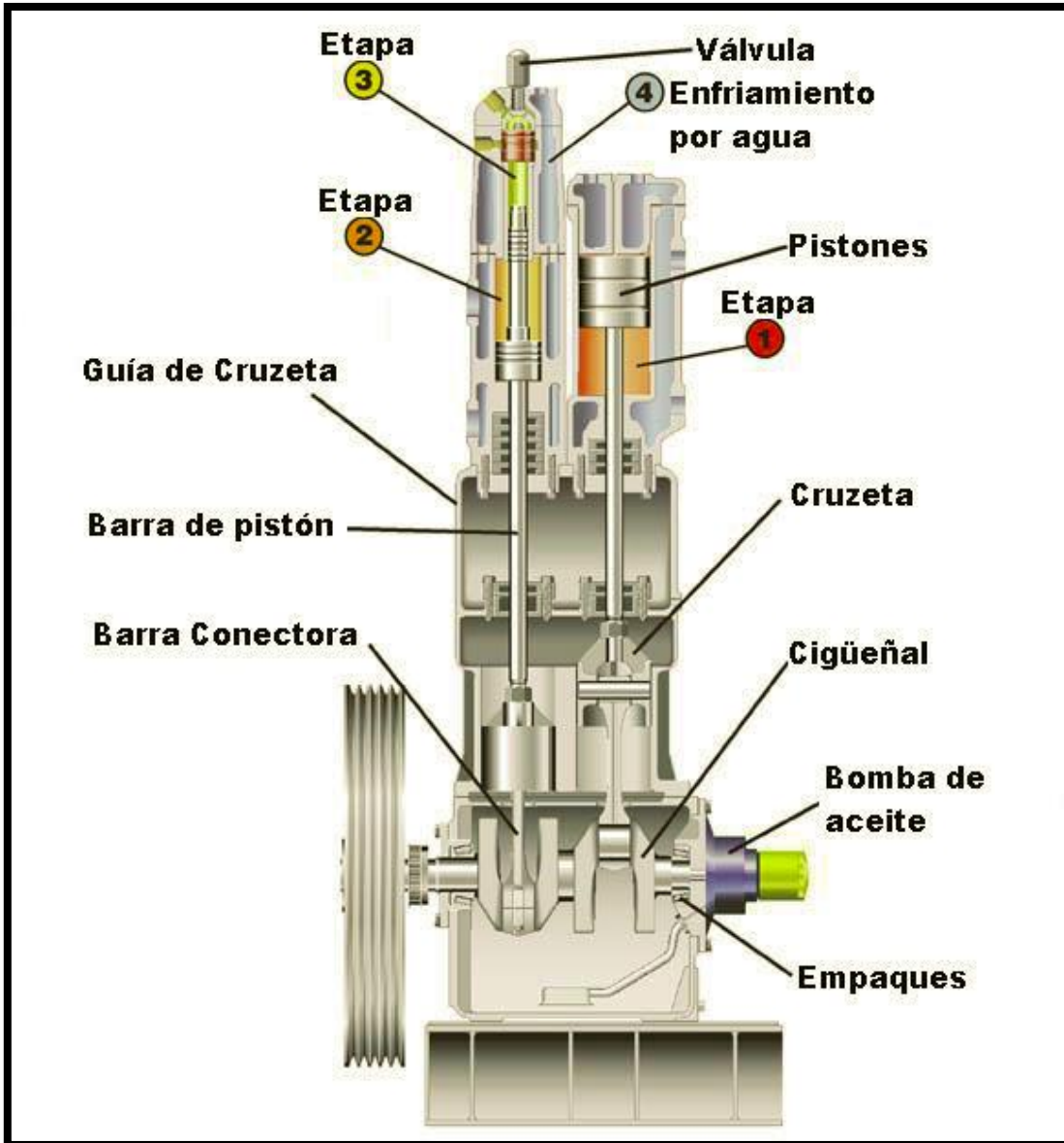


FIGURA 5. 6 Compresor axial. Fuente: Modificado NORMARK, 2005.

El almacenamiento de gas comprimido presenta dos riesgos intrínsecos. Primero, cualquier sustancia almacenada a altas presiones implica un riesgo, no importa si se trata de un gas inerte o hidrógeno. Segundo, si un tanque de presión presenta una fuga, el hidrógeno se esparcirá rápidamente en gran cantidad, sin embargo, la posibilidad de que se concentre en cantidad suficiente para ser peligroso es menor.

5.6.2 Almacenamiento.

Debido a su baja densidad, el hidrógeno es un gas difícil de almacenar. Sin embargo, existe una gran variedad de posibilidades para su almacenamiento de forma que puede seleccionarse la técnica más adecuada para cada aplicación. No obstante, la dificultad del almacenamiento del hidrógeno es tal que su uso en algunas aplicaciones, queda limitado hasta el momento en que se desarrollen y comercialicen sistemas de almacenamiento convenientes en términos de peso, volumen y costos. El tipo de almacenamiento de este elemento depende del estado de agregación en el que se encuentre puesto que de esto dependen algunas de sus propiedades.³⁵

5.6.2.1 Sólido.

El almacenamiento sólido es potencialmente seguro y eficiente tanto para aplicaciones de transporte como estacionarias. Se consideran cuatro grupos de materiales adecuados para este tipo de almacenamiento.²⁷

5.6.2.1.1 Materiales basados en el carbono (nanotubos y nanofibras de grafito)

Los nanotubos de carbono (CNT's) están constituidos por redes hexagonales de carbono curvadas y cerradas, formando tubos de carbono nanométricos con una serie de propiedades excelentes que fundamentan el interés que han despertado en numerosas aplicaciones tecnológicas. Son sistemas ligeros, huecos y porosos que tienen alta resistencia mecánica, y por tanto, interesantes para el reforzamiento estructural de materiales y formación de resinas de bajo peso, alta resistencia a la tracción y enorme elasticidad.²⁷

En términos de su capacidad de almacenamiento, las nanoestructuras de carbono, gracias a su baja masa y su alta capacidad de adsorción, se presentan como las más eficientes en comparación con el grafito de gran área superficial (25% extra a temperaturas bajas). Este sistema puede permitir almacenar densidades doble

que las que actualmente se obtienen con tanques de H₂ líquido. No obstante, diversos experimentos realizados con nanotubos de carbono han puesto de manifiesto que el almacenamiento de hidrógeno en nanotubos de carbono es posible únicamente a temperaturas extremadamente bajas (inferiores a -196 °C).²⁷

Además, cuando la muestra se deja a temperatura ambiente, se evapora la mayor parte del hidrógeno. Aunque esta tecnología recibió una gran atención en la pasada década, el consenso general actual es que las grandes capacidades de almacenamiento (30 – 60 % en peso) que se publicaron hace unos años, fueron el resultado de errores de medida. Lo cierto es que los experimentos muestran resultados variables y no existe unanimidad respecto a ellos.²⁷

5.6.2.1.2 Hidruros recargables.²⁷

El hidrógeno tiene la propiedad de reaccionar con diferentes metales de transición formando compuestos denominados hidruros. Los hidruros han sido estudiados durante décadas y sus propiedades son bien conocidas. Las reacciones son reversibles en condiciones adecuadas de presión y temperatura y, por tanto, una determinada masa metálica puede ser cargada y descargada un número prácticamente ilimitado de veces y se puede utilizar como depósito de almacenamiento sólido de H₂. Casi todos los hidruros operan a presiones moderadas, no hay pérdidas y además permiten la limpieza del hidrógeno. El hidrógeno se libera cuando se aplica calor a los materiales, a través, por ejemplo, del calentamiento del tanque y mediante la reducción de la presión.²⁷

Este tipo de almacenamiento es seguro y manejable y permite almacenar más H₂ por unidad de volumen que con el hidrógeno líquido. Sin embargo el peso del sistema es elevado como consecuencia de los bajos niveles de retención de H₂ (< 2,5% en peso). Por tanto no son adecuados para aplicaciones móviles. Es especialmente útil para aplicaciones estacionarias aisladas y con energía eléctrica procedente de fuentes renovables.

5.6.2.2 Líquido.²⁷

El hidrógeno puede almacenarse en forma líquida a temperaturas criogénicas (-253°C). Como principal ventaja el hidrógeno líquido ofrece su densidad energética por unidad de volumen (muy superior a la del hidrógeno gas) incluso a relativamente bajas presiones. Sin embargo, también presenta importantes desventajas aunque su uso en el sector automotriz ya haya sido probado por algunos fabricantes importantes con BMW (Bayerische Motoren Werke o en español Fábricas Bávaras de Motores). Aproximadamente, en el proceso de licuación del hidrógeno se pierde del 30 al 40% de la energía. Además, existen pérdidas por evaporación en los periodos en los que no se utiliza el sistema y resulta imprescindible usar contenedores criogénicos altamente aislados (Figura 5.7).²⁷

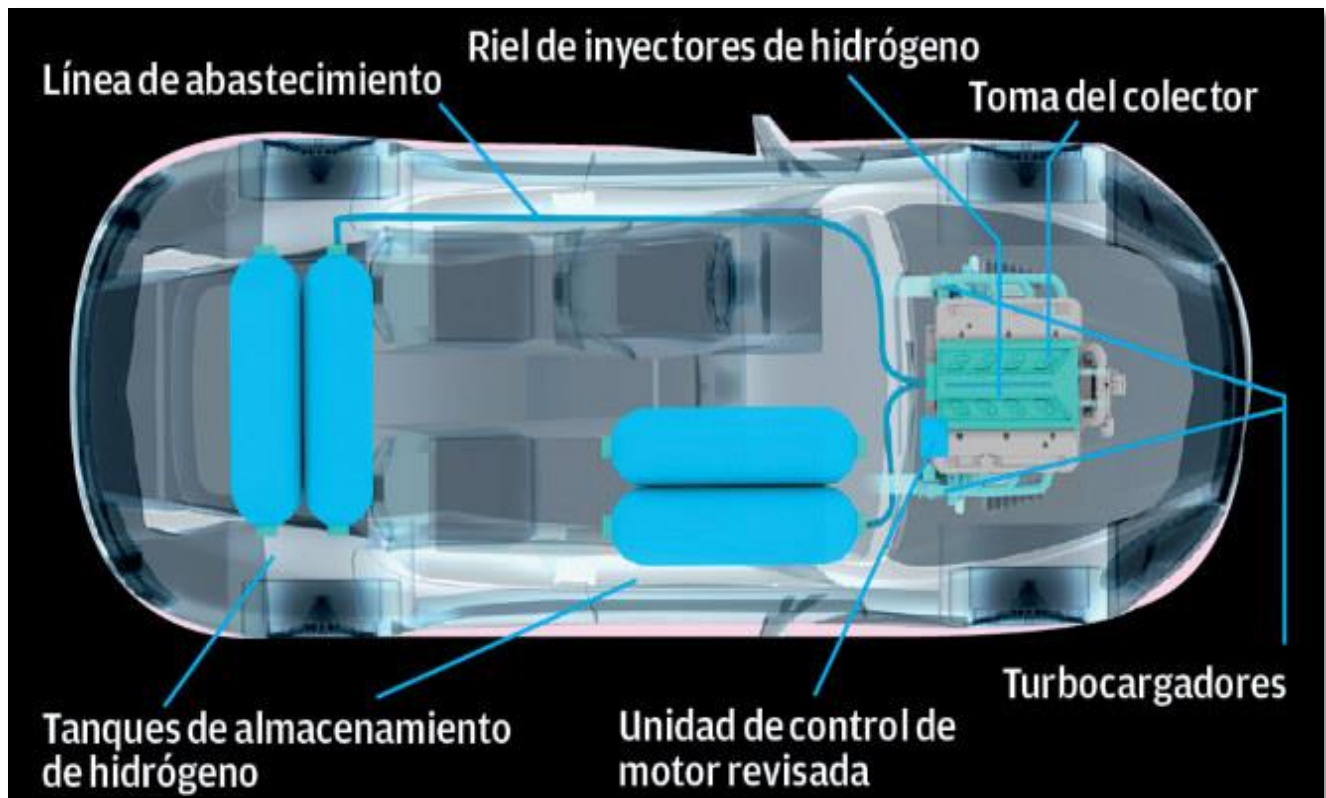


FIGURA 5.7 Tanque de hidrogeno liquido LINE. Fuente: Antonio González García-Conde, Presidente de la Asociación Española del Hidrógeno, "Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno". Director del Departamento de Aerodinámica y Propulsión, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Páginas 1 a la 16.

5.6.2.2.1 Otros sistemas de almacenamiento líquido.²⁷

El uso de disoluciones de borohidruros es otra de las alternativas para el almacenamiento de hidrógeno en medio líquido. En este caso, el hidrógeno se libera a partir de una reacción de hidrólisis catalítica:



La densidad de almacenamiento teórica es de 10,9 % en peso. La principal ventaja que ofrecen estas disoluciones es que permiten una generación de hidrógeno a bordo del vehículo segura y controlable, mientras que la desventaja fundamental consiste en que el producto de la reacción (NaBO_2) tiene que almacenarse para ser descargado del vehículo y ser regenerado a NaBH_4 , en un proceso que no puede producirse a bordo.²⁷

Por otro lado, algunos líquidos orgánicos pueden utilizarse para almacenar indirectamente el hidrógeno en forma líquida. El concepto básico se resume en tres pasos: en primer lugar el líquido orgánico se deshidrogena siguiendo un proceso catalítico para producir hidrógeno a bordo. En segundo lugar el producto deshidrogenado se transporta desde el tanque del vehículo hasta una planta central de proceso, mientras se rellena el tanque con el líquido rico en H_2 .²⁷

Finalmente, es necesario re-hidrogenación del líquido deshidrogenado previamente para devolverlo a la estación de llenado. Un ejemplo típico es el caso del tolueno (C_7H_8) y el metilciclohexano (C_7H_{14}). Con esta técnica se alcanzan densidades de almacenamiento de 6,1 % en peso, pero presenta como principales desventajas, que el hidrógeno solo se libera a altas temperaturas (300 – 400 °C) y que el uso de estos productos requiere de estudios adicionales relacionados con la seguridad y la toxicidad.

5.6.2.3 Gaseoso,²⁷

En almacenamiento gaseoso se trabaja con tanques de alta presión de acero reforzado con fibra de carbono, no sólo para reducir el volumen de almacenamiento, sino también para evitar la difusión de hidrógeno a través de las paredes del tanque. En este sentido, se trabaja actualmente en el desarrollo de tecnología a 700 bar de presión. También se trabaja en evitar fugas de hidrógeno a través de las conexiones del sistema. Aspectos que también se están considerando para el desarrollo tecnológico son los efectos de cargas cíclicas, los tiempos de vida de los tanques y la percepción de seguridad para el usuario (figura 5.8).²⁷



FIGURA 5. 8 Tanques de almacenamiento. Fuente: 120. <http://spanish.alibaba.com/p-detail/almacenamiento-de-hidr%C3%B3geno-puede-300000138617.html>

5.6.2.3.1 Micro esferas de vidrio.²⁷

Una alternativa al almacenamiento de hidrógeno gas, para aplicaciones automotriz, lo ofrecen las microesferas de vidrio. El proceso de carga del hidrógeno se realiza aprovechando la permeabilidad del hidrógeno a alta presión (350-700 bar) y temperaturas de 300°C en los huecos de las microesferas en un envase resistente a la presión. Una vez realizada la carga, el sistema se enfría hasta temperatura ambiente de forma que el gas queda retenido en las microesferas. A esta temperatura el tanque, así cargado, puede transferirse al vehículo. Posteriormente, para su uso, es necesario calentar la microesferas a 200-300°C para liberar el hidrógeno de forma controlada y alimentar el motor o la pila de combustible (figura 5.9).²⁷

Los principales problemas que presenta esta técnica son la baja densidad volumétrica y las altas presiones de llenado. Así mismo, las temperaturas de liberación del hidrógeno son demasiado altas si se considera su uso en vehículos a pila de combustible tipo PEM, que opera en torno a 70-80°C.

No obstante, ofrecen la ventaja de ser inherentemente seguras dado que el hidrógeno se almacena a bordo a baja presión y que es una técnica adecuada para tanques moldeables. Se ha demostrado una densidad de almacenamiento del 5,4 % en peso (Hydrogen Implementing Agreement – Agencia Internacional de la Energía).²⁷



FIGURA 5 9 Microesferas de vidrio. Fuente: Antonio González García-Conde, Presidente de la Asociación Española del Hidrógeno, “Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno”. Director del Departamento de Aerodinámica y Propulsión, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Páginas 1 a la 16.

CAPITULO 6

SIMULACIÓN DEL

PROTOTIPO PARA 10 W,

100 W, 100 KW, 100MW

Y 1 GW.

Capítulo 6 Simulación del prototipo para 10W, 100W, 100KW, 100MW, y 1GW.

6.1 Propuesta.

En esta tesis se propone la adaptación de un Ciclo de Potencia Rankine supercritico con el objeto de que opere con hidrógeno como combustible, originalmente dicho Ciclo de Potencia está diseñado para operar mediante una reacción de combustión con hidrocarburos. La propuesta de este proyecto es generar los mismos beneficios del Ciclo Rankine pero de una forma ecológica, responsable con el medio ambiente y con una reacción cambiable (ciclo físico-químico del agua). Este ciclo se simuló en el programa PRO II para obtener las siguientes potencias: 10 W, 100 W, 100 KW, 100 MW y 1 GW, utilizando como base el cálculo del ciclo Rankine básico de 1GW.

6.2 Descripción General.

La simulación nos permitirá predecir las condiciones óptimas mediante las cuáles el Ciclo Rankine puede operar haciendo uso del hidrógeno como combustible; tomando como referencia las siguientes condiciones de operación y el cálculo del ciclo Rankine de 1 GW:

- Potencia: 10W, 100W, 100KW, 100MW y 1GW.
- Presión: 1 atm.

Como base utilizamos el ciclo Rankine de 1 GW de potencia para poder generar las ecuaciones y la simulación del resto de las potencias.

Para las capacidades de 10 W, 100 W y 100 KW de salida de potencia eléctrica se utilizará una planta de electrólisis para la captación, almacenamiento y uso como

fuentes de energía renovable para generar potencia eléctrica por medio del ciclo Rankine, utilizando los siguientes equipos:

- Una caldera
- Un intercambiador de calor
- Una turbina
- Un condensador
- Una bomba centrífuga.

La caldera no fue simulada puesto que la caldera que utiliza el Simulador PRO II realiza el trabajo con hidrocarburos y no con hidrógeno como nosotros lo necesitamos. Sin embargo la simulación de la caldera es otro trabajo de tesis.

Para las capacidades de 100 KW, 100 W y 10 W de salida de potencia eléctrica, el ciclo Rankine del fluido motor se representan por las corrientes 8, 5, 6, 7 y 8 y se inicia en esta última corriente durante el bombeo de agua líquida al intercambiador de calor. El ciclo es por consiguiente supercrítico, realizado el trabajo el vapor extenuado sale por la corriente 6 y se condensa en la corriente 7 para ser bombeado y de nueva cuenta comenzar el ciclo, como se muestra en los diagramas de flujo de procesos (Figuras 6.1, 6.2 y 6.3). Por consiguiente es un ciclo supercrítico.

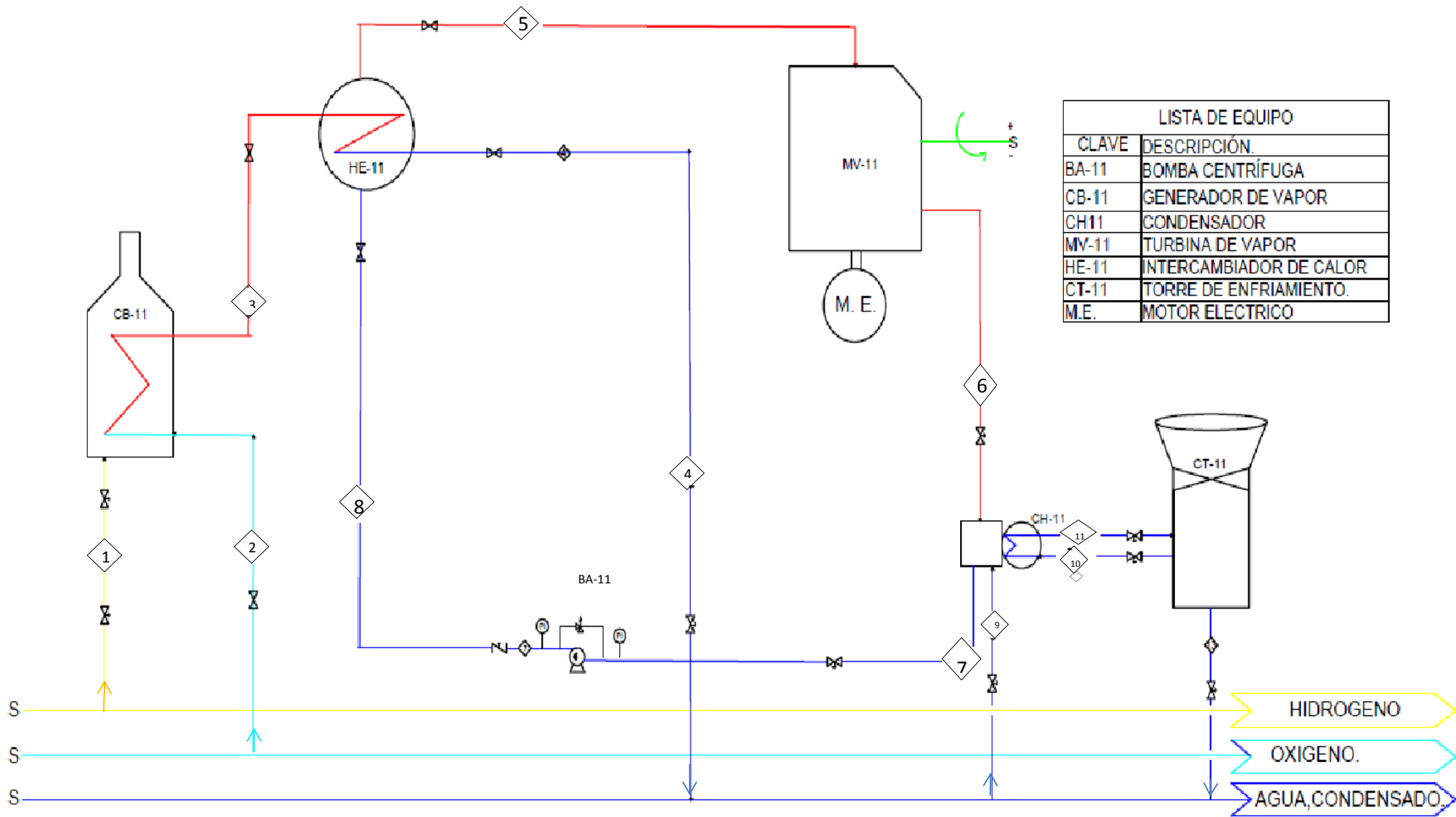


FIGURA 6. 1 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CICLO RANKINE PARA 10 W, 100 W y 100KW DE POTENCIA.

Para la capacidad instalada de 100 MW de potencia eléctrica a la salida, al igual que en los procesos Rankine anteriores se utilizará una planta de electrólisis como fuente de energía renovable y proveedor de las materias primas hidrógeno y oxígeno para así poder generar la potencia eléctrica que se requiere. Los equipos que de utilizaran son:

- Una caldera
- Dos intercambiadores de calor
- Dos turbinas
- Un condensador
- Una bomba centrífuga.

Para la capacidad de 100 MW de salida de potencia eléctrica, el ciclo Rankine del fluido motor se representan por las corrientes 13, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y se inicia en esta ultima corriente durante el bombeo de agua liquida a los intercambiadores de calor. El ciclo es por consiguiente un ciclo supercritico, realizado el trabajo el vapor extenuado sale por las corriente 11 y se condensa en la corriente 12 para ser bombeado y de nueva cuenta comenzar el ciclo. Como se muestra en el diagrama de flujo de procesos (Figura 6.2).

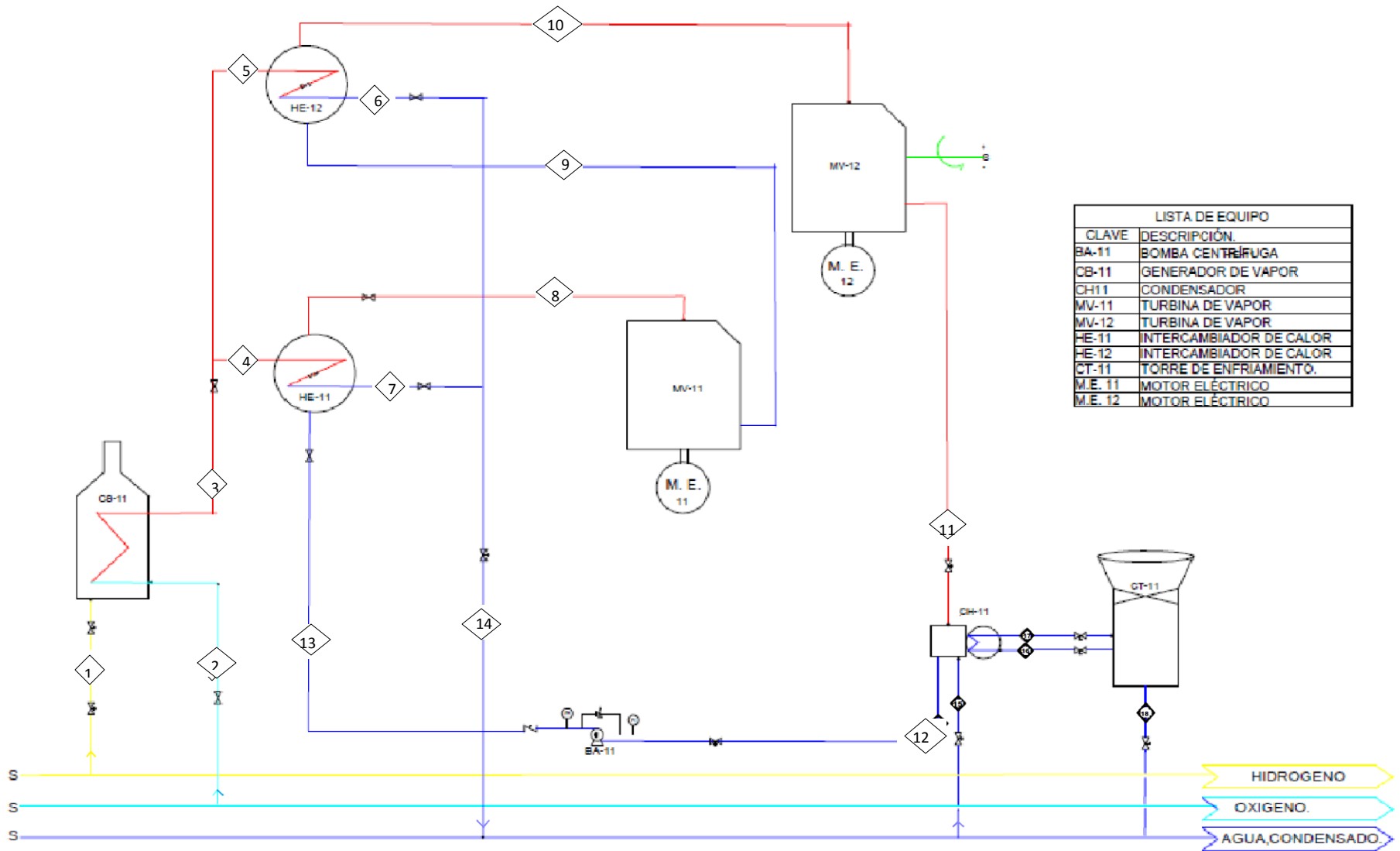


FIGURA 6. 2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CICLO RANKINE PARA 100 MW.

Para la potencia instalada de 1 GW de potencia eléctrica generada por el ciclo Rankine se utilizarán los siguientes equipos:

- Una caldera
- Tres intercambiadores de calor
- Tres turbinas
- Un condensador
- Una bomba centrífuga.

Para la capacidad de 1 GW de salida de potencia eléctrica, el ciclo Rankine del fluido motor se representan por las corrientes 15, 9, 10, 18, 11, 12, 13, 14, 15 y se inicia en esta última corriente durante el bombeo de agua líquida los intercambiadores de calor para su vaporización. El ciclo es por consiguiente un ciclo supercrítico, realizado el trabajo el vapor extenuado sale por las corrientes 13 y se condensa en la corriente 14 para ser bombeado y de nueva cuenta comenzar el ciclo, como se muestra en el diagrama de flujo de procesos (Figuras 6.3).

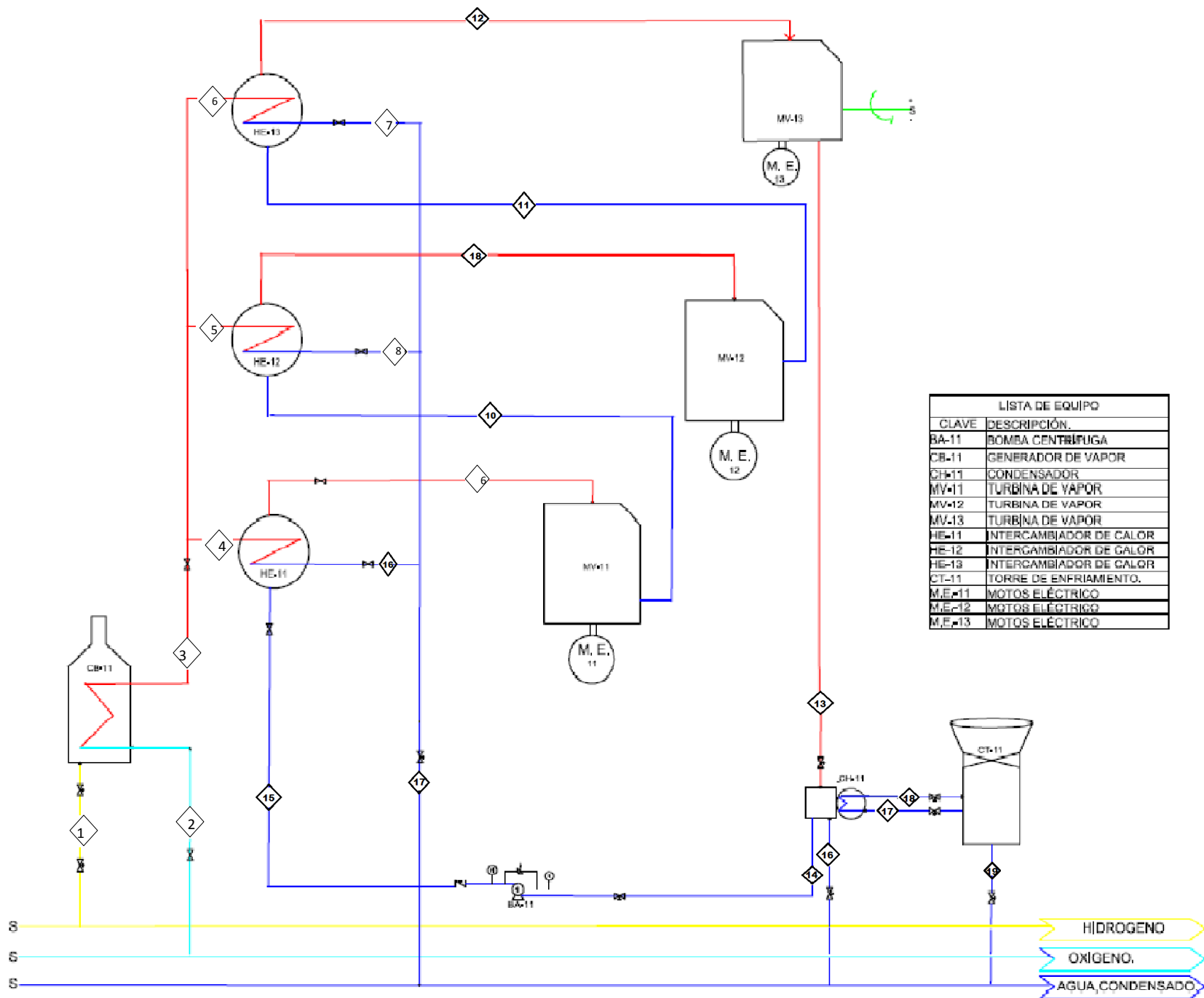


FIGURA 6.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CICLO RANKINE PARA 1 GW

6.3 Simulación.

Para este trabajo se simuló en el programa Pro II, utilizando como base el cálculo del ciclo Rankine para la potencia de 1GW.

Pro II es un simulador de procesos en estado estacionario para el diseño de estos y análisis operativo de los ingenieros en la química, el petróleo, el gas natural, el procesamiento de sólidos, y de polímero de industrias.

Contiene una biblioteca de componentes químicos, los métodos de predicción de propiedades termodinámicas y operaciones unitarias tales como columnas de destilación, intercambiadores de calor, compresores, y los reactores que se encuentran en las industrias de procesamiento químico. Se puede calcular el balance de masa y energía, así como los cálculos para el modelado de procesos continuos.

A continuación se darán los pasos para realizar el procedimiento general para ejecutar la simulación en el programa Pro II.

1. Definir las unidades de medidas: Sistema métrico, inglés, internacional, etc.
2. Seleccionar los componentes u operaciones unitarias.
3. Definir el método termodinámico a emplear de acuerdo con las condiciones de trabajo y los componentes.
4. Construir el DFP con base en: las corrientes involucradas y los equipos empleados en el proceso.
5. Proporcionar las condiciones de las corrientes de proceso, y de los equipos.
6. Correr la simulación.
7. Analizar los resultados.

Para 1 GW se obtuvo la siguiente simulación.

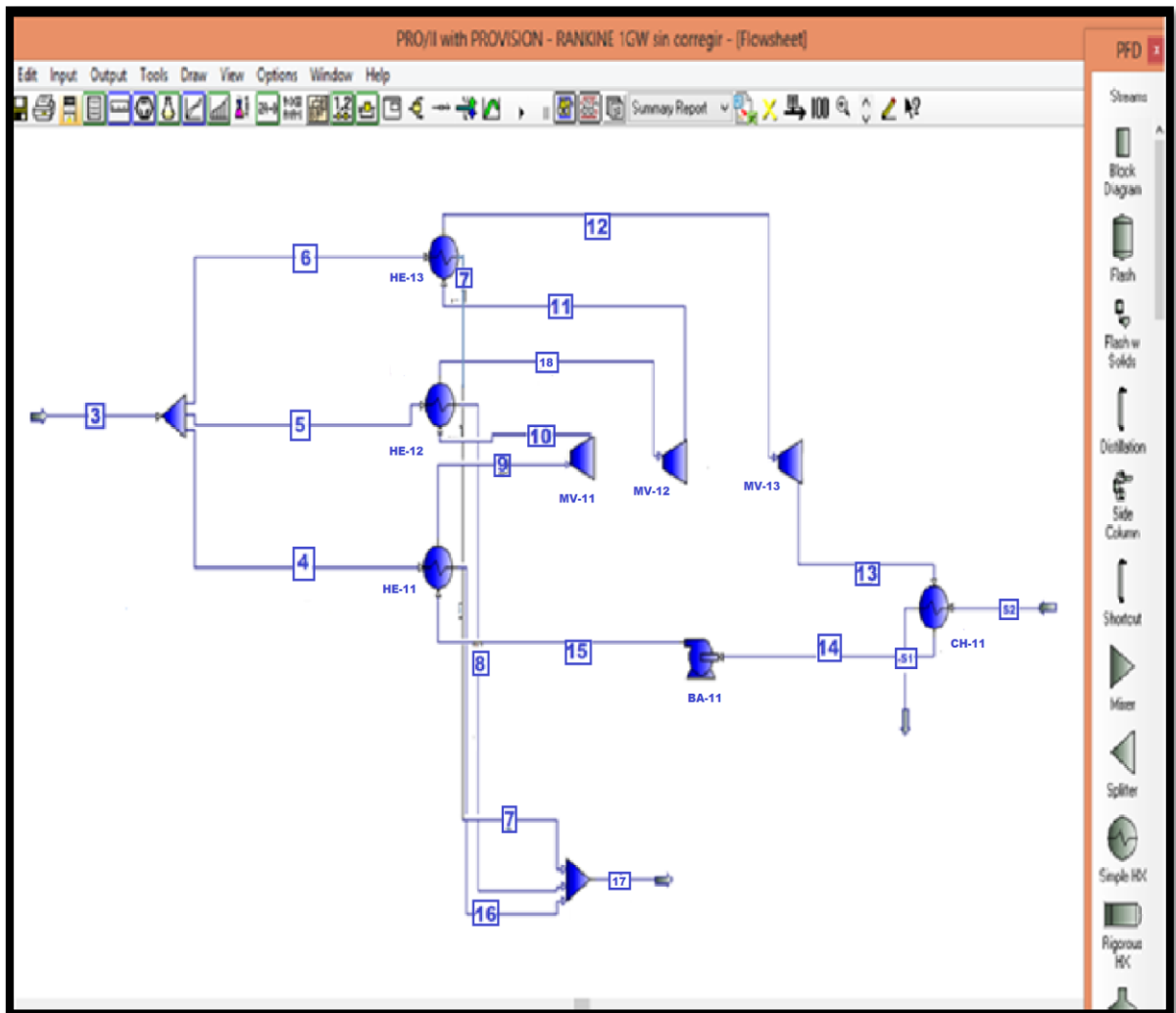


FIGURA 6. 4 Diagrama del simulador PRO II para 1 GW

Condiciones de las corrientes.

Nombre de la corriente		3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temperatura	C	3000	3000	3000	3000	150	150	608.24097	601.38488 8	272.83154 3
Presión	BAR	250	250	250	250	250	250	250	30	4
Flujo	KG- MOL/SEC	9.3925822 97	6.1401138 3	2.000489	1.2599527 26	3.7600002	2.000489	14.371743 2	14.371743 2	14.371743 2

Nombre de la corriente		12	13	14	15	16	17	18	S1	S2
Temperatura	C	626.8501	29.65967	29	29	150	150	607.15222	20.8501	29
Presión	BAR	4	0.0450810 2	0.0450810 2	250	250	250	30	0.04	0.04
Flujo	KG- MOL/SE C	14.371743 2	14.371743 2	14.371743 2	14.3717 432	6.14011 383	9.3925822 97	14.371743 2	1.70514607	1.7051 4607

Tabla 6. 1 Valores para las corrientes según el simulador PRO II para la capacidad de 1 GW de potencia.

Las corrientes S1 y S2 son las corrientes del agua de enfriamiento.

Para las turbinas el simulador nos arroja los valores siguientes:

Nombre del expansor		MV-11	MV-12	MV-13
Descripción del expansor				
Presión de entrada	BAR	250	30	4
Presión de salida	BAR	30	4	0.0451
Temperatura de salida	C	621.3849	512.8315	54.6597
Trabajo actual	HP	404166.563	328859.031	1339994.63

Tabla 6. 2 Valores que arroja el simulador PRO II para las turbinas en el ciclo de 1 GW.

Para la capacidad de 100 MW el simulador nos arroja los resultados siguientes:

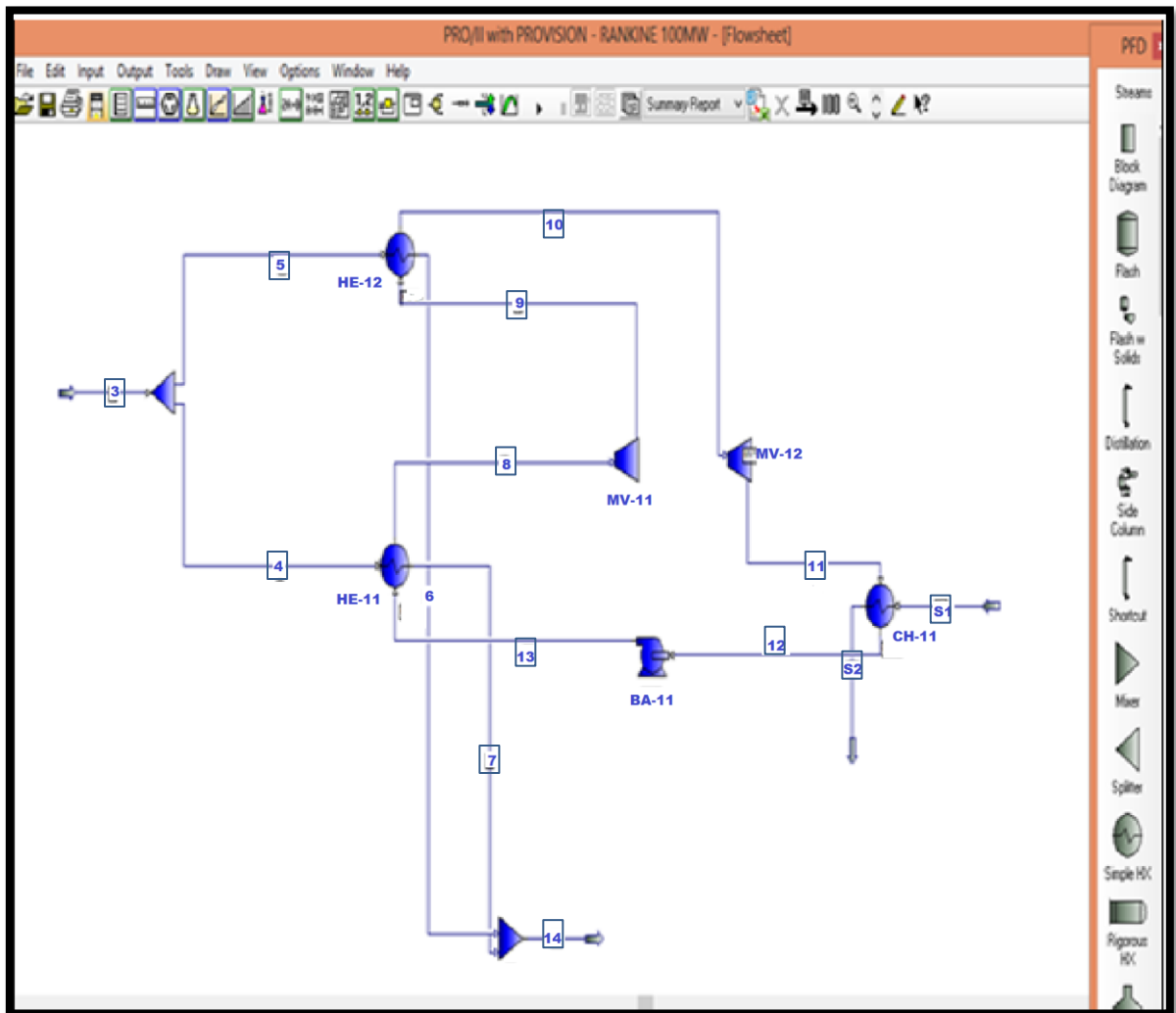


FIGURA 6. 5 Diagrama del simulador PRO II para 100 MW

Valores de las condiciones de las corrientes del ciclo Rankine para 100 MW.

Nombre de la corriente		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	S1	S2
Temperatura	C	3000	3000	3000	150	150	600	430	260	29	29	29	150	20.85	29
Presión	BAR	250	250	250	250	250	250	4	30	0.04	0.04	250	250	0.04	0.04
Flujo	KG-	0.939	0.580	0.359	0.359	0.580	2.28	2.288	2.288	2.288	2.288	2.288	.9399	1.666	1.666
	MOL/SEC	2582	183	833	833	166	888	88	88	88	88	88	999	66	66
		297													

Tabla 6. 3 Valores para las corrientes según el simulador PRO II para la capacidad de 100 MW de potencia.

Las corrientes S1 y S2 son las corrientes del agua de enfriamiento.

Para las turbinas el simulador PRO II nos da los siguientes valores:

Nombre del expansor		MV-11	MV-12
Descripción del expansor			
Presión de entrada	BAR	250	30
Presión de salida	BAR	40	0.0451
Temperatura de salida	C	450	29.697
Trabajo actual	HP	6629.2951	13410.606

Tabla 6. 4 Valores que arroja el simulador PRO II para las turbinas en el ciclo de 100 MW.

Simulación del ciclo Rankine Para la capacidad de 100 KW de potencia.

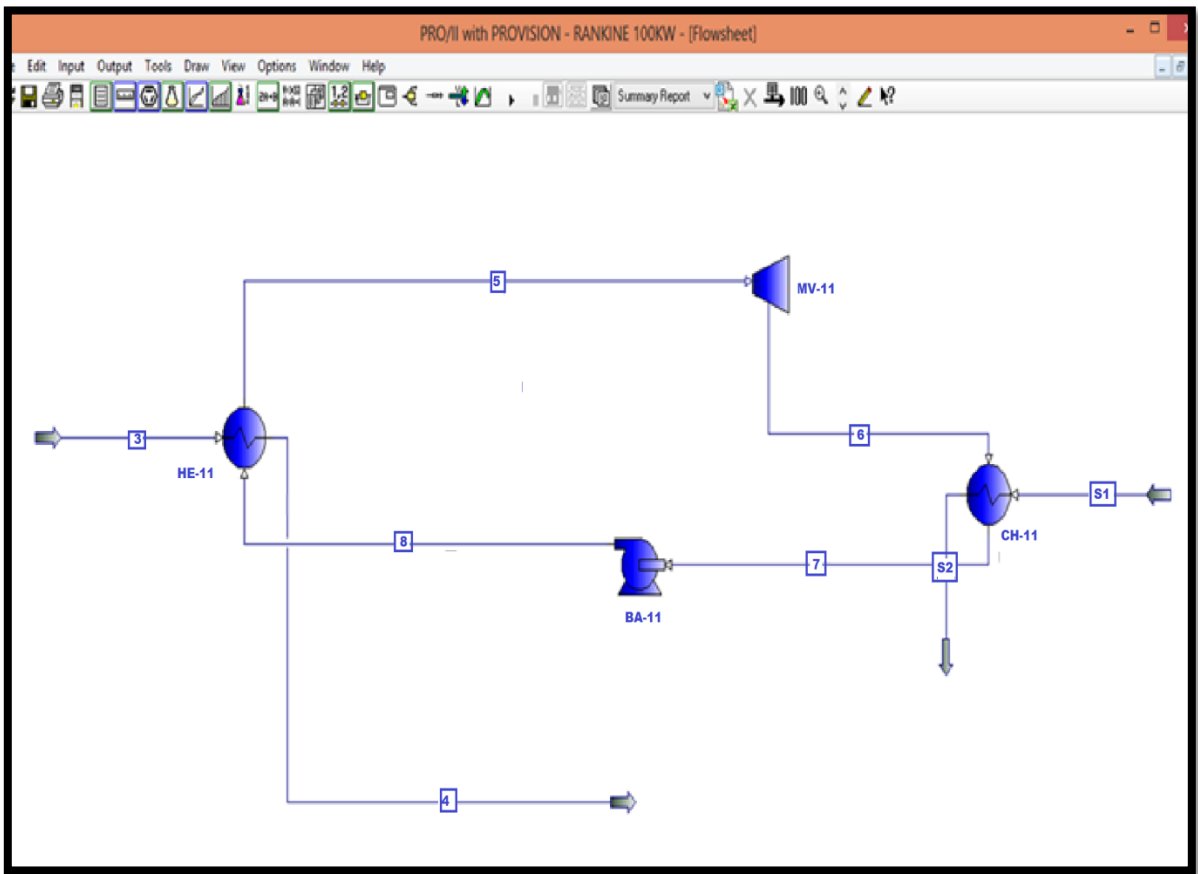


FIGURA 6. 6 Diagrama del simulador PRO II para 100 KW

Valores para las condiciones de las corrientes del ciclo Rankine.

Nombre de la corriente		3	4	5	6	7	8	S1	S2
Temperatura	C	3000	134.83	720	29	29	28	20.8501	29
Presión	BAR	149.954	134.8333 3	94.6666	3.404113	3.404113	134.8333 3	0.04	0.04
Flujo	G- MOL/SEC	3.226205 755	0.939258 23	2.286947 525	2.286947 525	2.286947 525	2.286947 525	1.66666	1.66666

Tabla 6. 5 Valores para las corrientes según el simulador PRO II para la capacidad de 100 KW de potencia.

Las corrientes S1 y S2 son las corrientes del agua de enfriamiento.

Valores que calcula el simulador PRO II para la turbina.

Nombre del expansor		EX1
Descripción del expansor		
Presión de entrada	BAR	94.6666
Presión de salida	BAR	3.404113
Temperatura de salida	C	29
Trabajo actual	HP	134.102006

Tabla 6. 6 Valores que arroja el simulador PRO II para las turbinas en el ciclo de 100 KW.

Simulación del ciclo Rankine para la capacidad de 100 W de potencia.

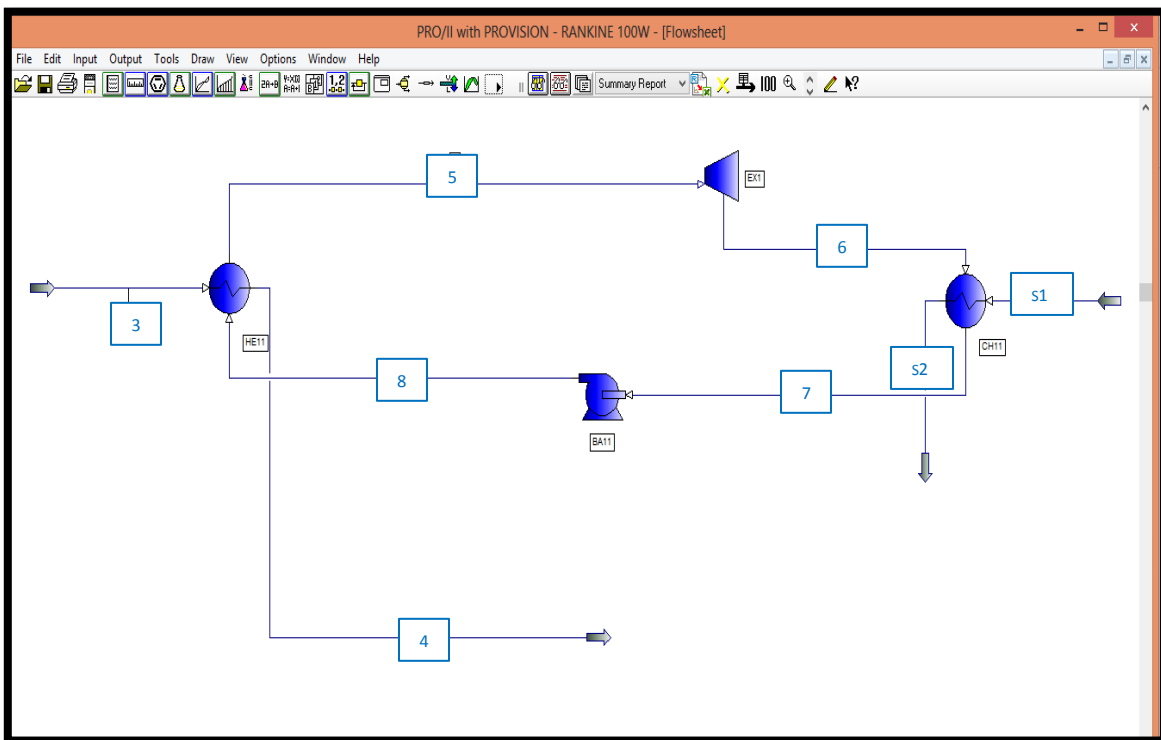


FIGURA 6.7 Diagrama del simulador PRO II para 100 W

Valores para cada una de las condiciones de las corrientes del ciclo Rankine según el simulador.

Nombre de la Corriente		3	4	5	6	7	8	S1	S2
Temperatura	C							20.850 1	29
Presión	BAR	12.69	12.69	5.5769 86	0.0034 041	0.0034 041	5.5769 86	0.04	0.04
Flujo	G-MOL/SEC	0.0032 26206	0.0009 39258	0.0022 86948	0.0022 86948	0.0022 86948	0.0022 86948	1.6666 6	1.6666 6

Tabla 6. 7 Valores para las corrientes según el simulador PRO II para la capacidad de 100 W de potencia

Las corrientes S1 y S2 son las corrientes del agua de enfriamiento

Valores que calcula el simulador PRO II para la turbina.

Nombre del expansor	EX1	
Descripción del expansor		
Presión de entrada	BAR	5.576986
Presión de salida	BAR	0.0034041
Temperatura de salida	C	29
Trabajo actual	HP	0.13410201

Tabla 6. 8 Valores que arroja el simulador PRO II para las turbinas en el ciclo de 100 W.

Simulación del ciclo Rankine para la capacidad de 10 W de potencia.

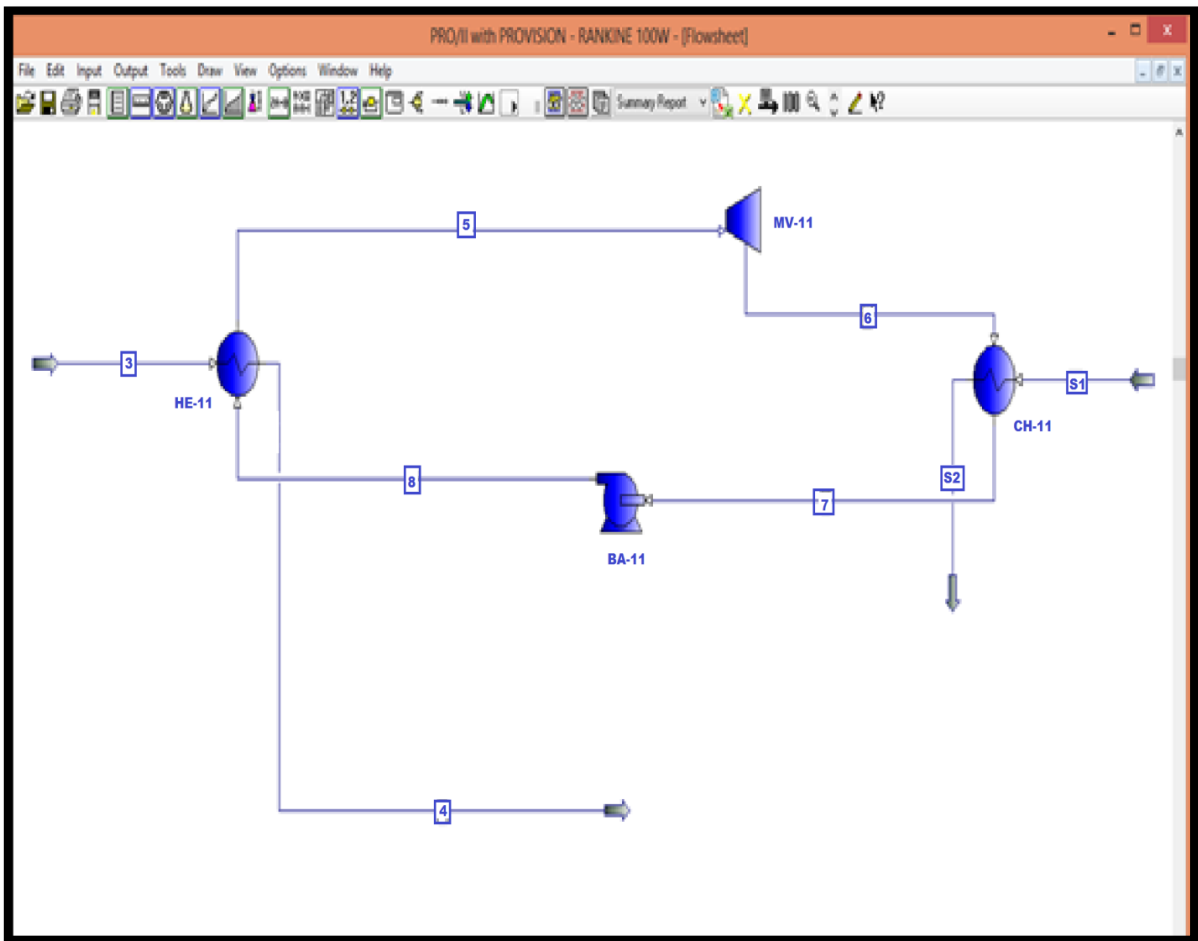


FIGURA 6. 8 Diagrama del simulador PRO II para 100 W

Valores para cada una de las condiciones de las corrientes del ciclo Rankine según el simulador.

Nombre de la corriente		3	4	5	6	7	8	S1	S2
Temperatura	C	3000	74.166	666.666	29	29	29	20.8501	29
Presión	BAR	9.6	9.6	3.88567	0.000399 79	0.000399 79	3.88567	0.0004	0.0004
Flujo	G-MOL/SEC	3.226208 E-04	9.39258E -05	0.000228 695	0.000228 695	0.000228 695	0.000228 695	1.66666	1.66666

Tabla 6. 9 Valores para las corrientes según el simulador PRO II para la capacidad de 10 W de potencia

Las corrientes S1 y S2 son las corrientes del agua de enfriamiento.

Valores que calcula el simulador PRO II para la turbina

Nombre del expansor		EX1
Descripción de expansor		
Presión de entrada	BAR	3.88567
Presión de salida	BAR	0.00039979
Temperatura de salida	C	29
Trabajo actual	HP	0.013410201

Tabla 6. 10 Valores que arroja el simulador PRO II para las turbinas en el ciclo de 100 W.

6.4 Filosofías de operación y control.

QUEMADOR.

El quemador para este proceso utiliza hidrógeno y oxígeno (obtenidos por el rompimiento de la molécula de agua mediante electrólisis), haciéndoles reaccionar y obteniendo vapor de agua.

Este vapor entrará al intercambiador de calor, después a la turbina y finalmente al condensador en donde cederá su calor, obteniendo agua en estado líquido que posteriormente, mediante electrólisis se vuelve a descomponer en hidrógeno y oxígeno.

El calor cedido será para calentar una corriente de agua que se transformará en vapor motriz. Se pretende generar vapor sobrecalentado de 620°C y 30 MPa, para la potencia de 1GW, para poder producir energía eléctrica mediante un ciclo Rankine supercrítico.

El vapor se generará del calor cedido por el vapor de combustión que resulta de la combustión de hidrógeno con oxígeno. Se utilizará la temperatura de gases de combustión (vapor de combustión) de 3000°C , esto porque se desea aprovechar al máximo la energía obtenida de la combustión.

El equipo consta básicamente de una carcasa interna, una carcasa externa y un arreglo de tubos con conductos cónicos. Tal como se muestra en la figura 6.11.

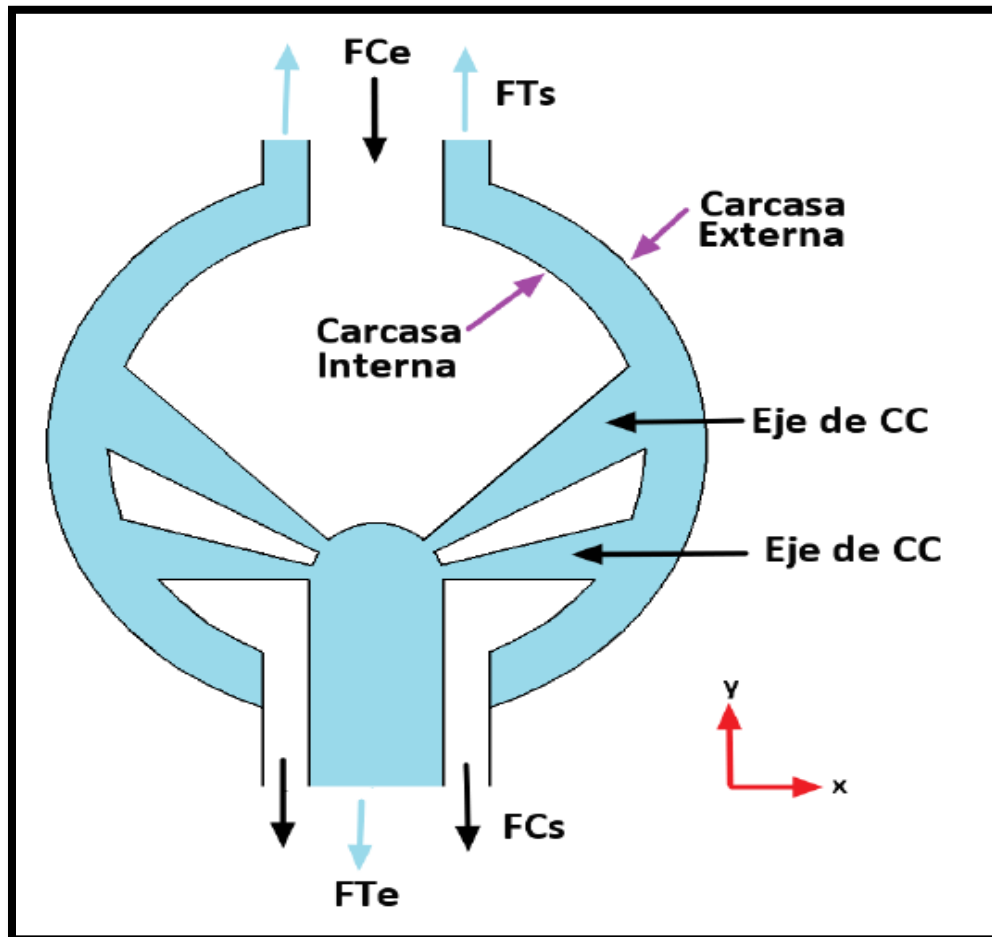


FIGURA 6.9 Quemador para hidrogeno.

INTERCAMBIADORES DE CALOR.

Los Intercambiadores de Calor son equipos utilizados para enfriar un fluido que está más caliente de lo deseado, transfiriendo esta calor a otro fluido que está frío y necesita ser calentado. La transferencia de calor se realiza a través de una pared metálica o de un tubo que separa ambos fluidos. Realiza la función doble de calentar y enfriar dos fluidos.

Para mantener la temperatura del producto (agua caliente) se debe disponer de otra variable (presiones y flujos) que se debe controlar para obtener la respuesta deseada, no obstante, los elementos que permiten el proceso deben ser administrados mediante un correcto sistema de control que permita optimizarlo, así como minimizar el impacto de las perturbaciones que puedan presentarse, las cuales no pueden ser anticipadas por los elementos del control.

La temperatura del agua depende no sólo de la cantidad de vapor, sino también del caudal de agua, su temperatura de entrada, el grado de incrustaciones del intercambiador y la temperatura ambiente.

Las variables controladas para estos equipos son las temperaturas de salida, las variables manipuladas son la posición de la válvula de vapor (cantidad de vapor suministrado) y finalmente las variables de carga son la temperatura ambiente, el caudal del agua de entrada y la temperatura del vapor.

TURBINA DE VAPOR.

La turbina de vapor alimenta al proceso con el vapor necesario requerido. Es importante controlar el flujo, la presión y la temperatura a la entrada de la turbina para optimizar el producto en la salida de la misma ya que por este sistema se obtendrán las diferentes potencias requeridas para el ciclo Rankine.

La función primaria del sistema es mantener la velocidad de la turbina a un valor fijado, regulando el flujo de vapor a través de la turbina. El sistema de control que utiliza este equipo es de relación ya que el flujo que sale de la turbina hacia el proceso y al condensador depende de la cantidad de flujo que entra a la turbina por consiguiente estas dos variables se relacionan para controlarlas

conjuntamente, utilizando un ajuste del relevador de relación para relacionar y controlar el flujo controlado y el no controlado entre la capacidad máxima de transmisor de proceso no controlada y la capacidad máxima controlada.

La variable independiente que es el flujo de entrada es manipulada o relacionada por un factor que se ajusta en la función de relación ya sea manual o automática, y este valor se converge en el set-point del controlador dependiente que es el flujo de salida de la turbina. Este último controla la válvula para seguir exactamente la demanda relacionada del transmisor independiente.

CONDENSADOR.

El condensador utilizado para este ciclo Rankine está colocado en la parte inferior de la turbina de vapor.

La función del condensador es transformar en su interior el vapor extraído de la turbina de vapor en líquido para posteriormente mediante una bomba centrífuga sea enviada nuevamente al intercambiador de calor y así cerrar el ciclo.

En el interior del condensador el vapor, pierde el calor que absorbió durante el proceso de evaporación desde el espacio a enfriar, así como también hace entrega del calor absorbido durante su circulación a través de la línea de retorno a la bomba y el calor absorbido durante el fenómeno de compresión en el interior del compresor.

Debido a esta entrega o pérdida de calor y a la presión a la que se somete, el vapor se condensa y constituye una fuente de agente refrigerante en estado líquido en condiciones de ser entregado repetidamente en el interior de la bomba.

BOMBA CENTRÍFUGA.

Las bombas utilizan el sistema de predominio de modo que exista un circuito de control operando normalmente una de las posibles variables continuas de esta forma hasta que la otra variable llegue a un cierto valor crítico. En este punto, esta última variable se convierte en el factor de control hasta que las condiciones críticas son remediadas. Las salidas de los controladores de presión

están conectadas aún selector de baja señal, estando el set-point del controlador de succión debajo de la presión de operación normal y su señal de salida estará a un máximo debido al error positivo con respecto al set-point.

El controlador en la descarga es una unidad de acción invertida y tiene su set-point a la presión de salida deseada. Consecuentemente su salida está normalmente debajo de la del controlador de succión.

Como las dos señales de salida de los controladores van a un relevador selector de baja señal, este último dejará pasar la más baja (en este caso la de la presión de descarga) bajo condiciones de operación normal, sin embargo, si la presión de succión cayera abajo del set –point, la salida de su controlador de presión decrementaria, llegando a un valor menor que la señal de descarga. Consecuentemente, el controlador de presión de succión tomaría la acción sobre la válvula y mantendría la operación satisfactoria.

EQUIPOS (tabla 6.11)

Lista de equipos	
Clave	Descripción
BA	BOMBA CENTRÍFUGA
CB	GENERADOR DE VAPOR O QUEMADOR
CH	CONDENSADOR
MV	TURBINA DE VAPOR
HE	INTERCAMBIADORES DE CALOR

Tabla 6. 11 Lista de equipos

CAPITULO 7

CÁLCULOS.

Capítulo 7 Cálculos.

7.1 Cálculo del ciclo Rankine.

Balance de masa para 1GW de potencia.

Equipo	Ecuación
Quemador de hidrogeno	$m_3 - m_1 - m_2 = 0$
intercambiador 1	$m_9 + m_{16} - m_4 - m_{15} = 0$
intercambiador 2	$m_{18} + m_8 - m_5 - m_{10} = 0$
intercambiador 3	$m_7 + m_{12} - m_6 - m_{11} = 0$
turbina 1	$m_{10} - m_9 = 0$
turbina 2	$m_{11} - m_{18} = 0$
turbina 3	$m_{13} - m_{12} = 0$
Condensador	$m_{14} - m_{13} = 0$
Bomba	$m_{15} - m_{14} = 0$
Planta de electrolisis	$m_1 + m_2 - m_{17} = 0$

TABLA 7. 1 Balance de masa para 1 GW

Balance de energía para 1GW de potencia.

Equipo	Ecuación
Quemador de hidrogeno	$\Delta H_c - 13333.33 = 0$
intercambiador 1	$m_9 h_9 + m_{16} h_{16} - m_4 \Delta H_c - m_{15} h_{15} = 0$
intercambiador 2	$m_{18} h_{18} + m_8 h_8 - m_{10} h_{10} - m_5 \Delta H_c = 0$
intercambiador 3	$m_7 h_7 + m_{12} h_{12} - m_{11} h_{11} - m_6 \Delta H_c = 0$
turbina 1	$P_1 + m_{10} h_{10} - m_9 h_9 = 0$
turbina 2	$P_2 + m_{11} h_{11} - m_{18} h_{18} = 0$
turbina 3	$P_3 + m_{13} h_{13} - m_{12} h_{12} = 0$
Condensador	$Q + m_{14} h_{14} - m_{13} h_{13} = 0$
Bomba	$-W_b + m_{15} h_{15} - m_{14} h_{14} = 0$
Planta de electrolisis	$m_3 \Delta H_c - m_{17} h_{17} - P_e = 0$

TABLA 7. 2 Balance de energía para 1 G

CONDICIONES DE OPERACIÓN.

- Para la Ciudad de México
- $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$
- $P_{salid} = 0.040\text{Bar}$
- $\eta_{bomba} = 85\%$
- Ninguna turbina trabaja arriba de 38°C en México
- A mayor presión en la turbina mayor eficiencia de la turbina pero no del ciclo
- Una turbina de contrapresión sólo funciona para lo que fue diseñada, si se quiere más vapor se tiene una de repuesto
- Una caldera es más eficiente quemando gases que el combustible sólidos (ya que tiene menor cantidad de agua).

corrientes	m (Kg/S)	P (bar)	T (°C)	h (KJ/ kg)	Estado
1	150.41	250	25	271.31	Gas
2	18.80	250	25	4234.00	Gas
3	169.21	250	3000	13333.33	Vapor
4	104.495	250	3000	13333.33	Vapor
5	34.041	250	3000	13333.33	Vapor
6	30.776	250	3000	13333.33	Vapor
7	30.776	250	150	647.20	Vapor
8	34.041	250	150	647.20	Vapor
9	412	250	600	3490.40	Vapor
10	412	30	260	2885.0	Vapor
11	412	4	260	2984.0	Vapor
12	412	4	600	3703.0	Vapor
13	412	0.004	29	2553.5	Liquido
14	412	0.04	29	121.0	Liquido
15	412	250	29	148.0	Liquido
16	104.495	250	150	647.2	Vapor
17	169.21	250	150	647.2	Vapor
18	412	30	600	3682.0	Vapor

TABLA 7. 3 Condiciones de las corrientes. Tabla de propiedades.

Sólo se presentan los resultados de masa y energía para 1GW puesto que fue la única potencia que se calculó manualmente, las demás potencias solo se simularon en PRO II.

Ecuaciones para el balance de masa para 100 MW de potencia.

Equipos	Ecuación
Quemador de hidrógeno	$m_3 - m_1 - m_2 = 0$
Intercambiador 1	$m_8 + m_7 - m_4 - m_{13} = 0$
Intercambiador 2	$m_6 + m_{10} - m_5 - m_9 = 0$
Turbina 1	$m_9 - m_8 = 0$
Turbina 2	$m_{11} - m_{10} = 0$
Condensador	$m_{12} - m_{11} = 0$
Bomba	$m_{13} - m_{12} = 0$
Planta de electrólisis	$m_1 + m_2 - m_{14} = 0$

TABLA 7. 4 Balance de masa para 100 MW de potencia.

Balance de energía para 100MW de potencia.

Equipos	Ecuación
Quemador de hidrógeno	$\Delta H_c - 13333.333 = 0$
Intercambiador 1	$m_8 h_8 + m_7 h_7 - m_4 \Delta H_c - m_{13} h_{13} = 0$
Intercambiador 2	$m_6 h_6 + m_{10} h_{10} - m_5 \Delta H_c - m_9 h_9 = 0$
Turbina 1	$P_1 + m_9 h_9 - m_8 h_8 = 0$
Turbina 2	$P_2 + m_{11} h_{11} - m_{10} h_{10} = 0$
Condensador	$Q + m_{12} h_{12} - m_{11} h_{11} = 0$
Bomba	$-W_b + m_{13} h_{13} - m_{12} h_{12} = 0$
Planta de electrólisis	$m_3 \Delta H_c - m_{14} h_{14} - P_c = 0$

TABLA 7. 5 Balance de energía para 100 MW de potencia

Ecuaciones para el balance de masa para 100 KW de potencia.

Equipos	Ecuación
Quemador de hidrógeno	$m_3 - m_1 - m_2 = 0$
Intercambiador 1	$m_5 + m_4 - m_3 - m_8 = 0$
Turbina 1	$m_6 - m_5 = 0$
Condensador	$m_7 - m_6 = 0$
Bomba	$m_8 - m_7 = 0$
Planta de electrólisis	$m_1 + m_2 - m_4 = 0$

TABLA 7. 6 Balnce de energia para 100 KW.

Balance de energía para 100 KW de potencia.

Equipos	Ecuación
Quemador de hidrógeno	$\Delta H_c - 13333.333 = 0$
Intercambiador 1	$m_5 h_5 + m_4 h_4 - m_3 \Delta H_c - m_8 h_8 = 0$
Turbina 1	$P_1 + m_6 h_6 - m_5 h_5 = 0$
Condensador	$Q + m_7 h_7 - m_6 h_6 = 0$
Bomba	$-W_b + m_8 h_8 - m_7 h_7 = 0$
Planta de electrólisis	$m_3 \Delta H_c - m_4 h_4 - P_c = 0$

TABLA 7. 7 Balance de energia para 100 KW

Ecuaciones para el balance de masa para 100 W de potencia.

Equipos	Ecuación
Quemador de hidrógeno	$m_3 - m_1 - m_2 = 0$
Intercambiador 1	$m_5 + m_4 - m_3 - m_8 = 0$
Turbina 1	$m_6 - m_5 = 0$
Condensador	$m_7 - m_6 = 0$
Bomba	$m_8 - m_7 = 0$
Planta de electrólisis	$m_1 + m_2 - m_4 = 0$

TABLA 7. 8 Balance de masa para 100 W

Balance de energía para 100 W de potencia.

Equipos	Ecuación
Quemador de hidrógeno	$\Delta H_c - 13333.333 = 0$
Intercambiador 1	$m_5 h_5 + m_4 h_4 - m_3 \Delta H_c - m_8 h_8 = 0$
Turbina 1	$P_1 + m_6 h_6 - m_5 h_5 = 0$
Condensador	$Q + m_7 h_7 - m_6 h_6 = 0$
Bomba	$-W_b + m_8 h_8 - m_7 h_7 = 0$
Planta de electrólisis	$m_3 \Delta H_c - m_4 h_4 - P_c = 0$

TABLA 7. 9 Balance de energía para 100 W

Ecuaciones para el balance de masa para 10 W de potencia.

Equipos	Ecuación
Quemador de hidrógeno	$m_3 - m_1 - m_2 = 0$
Intercambiador 1	$m_5 + m_4 - m_3 - m_8 = 0$
Turbina 1	$m_6 - m_5 = 0$
Condensador	$m_7 - m_6 = 0$
Bomba	$m_8 - m_7 = 0$
Planta de electrólisis	$m_1 + m_2 - m_4 = 0$

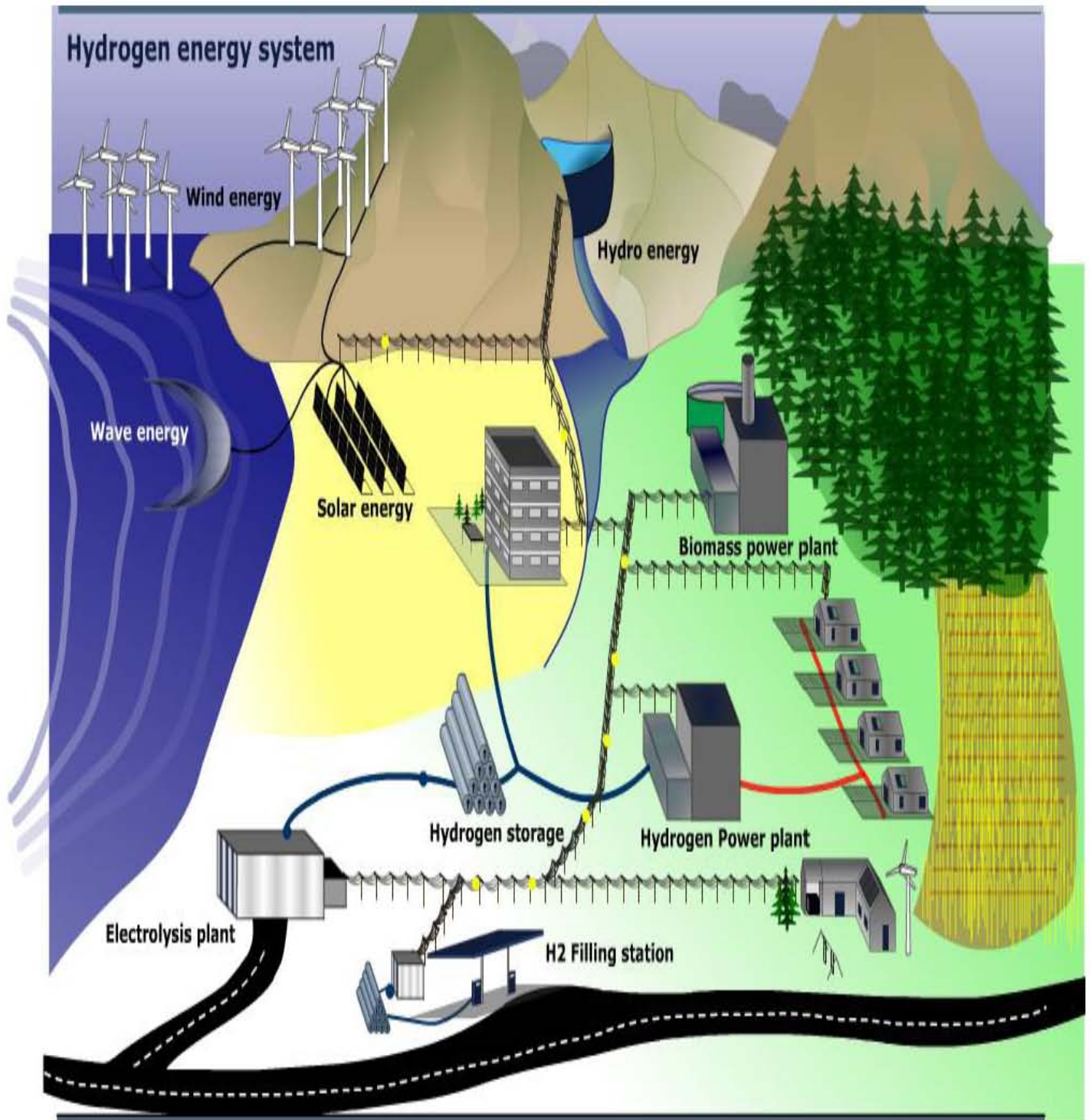
TABLA 7. 10 Balance de masa para 10 W.

Balance de energía para 10 W de potencia.

Equipos	Ecuación
Quemador de hidrógeno	$\Delta H_c - 13333.333 = 0$
Intercambiador 1	$m_5 h_5 + m_4 h_4 - m_3 \Delta H_c - m_8 h_8 = 0$
Turbina 1	$P_1 + m_6 h_6 - m_5 h_5 = 0$
Condensador	$Q + m_7 h_7 - m_6 h_6 = 0$
Bomba	$-W_b + m_8 h_8 - m_7 h_7 = 0$
Planta de electrólisis	$m_3 \Delta H_c - m_4 h_4 - P_c = 0$

TABLA 7.11 Balance de energía para 10 W.

Resultados y Conclusiones.



Para la potencia de 1GW los valores calculados para las corrientes son:

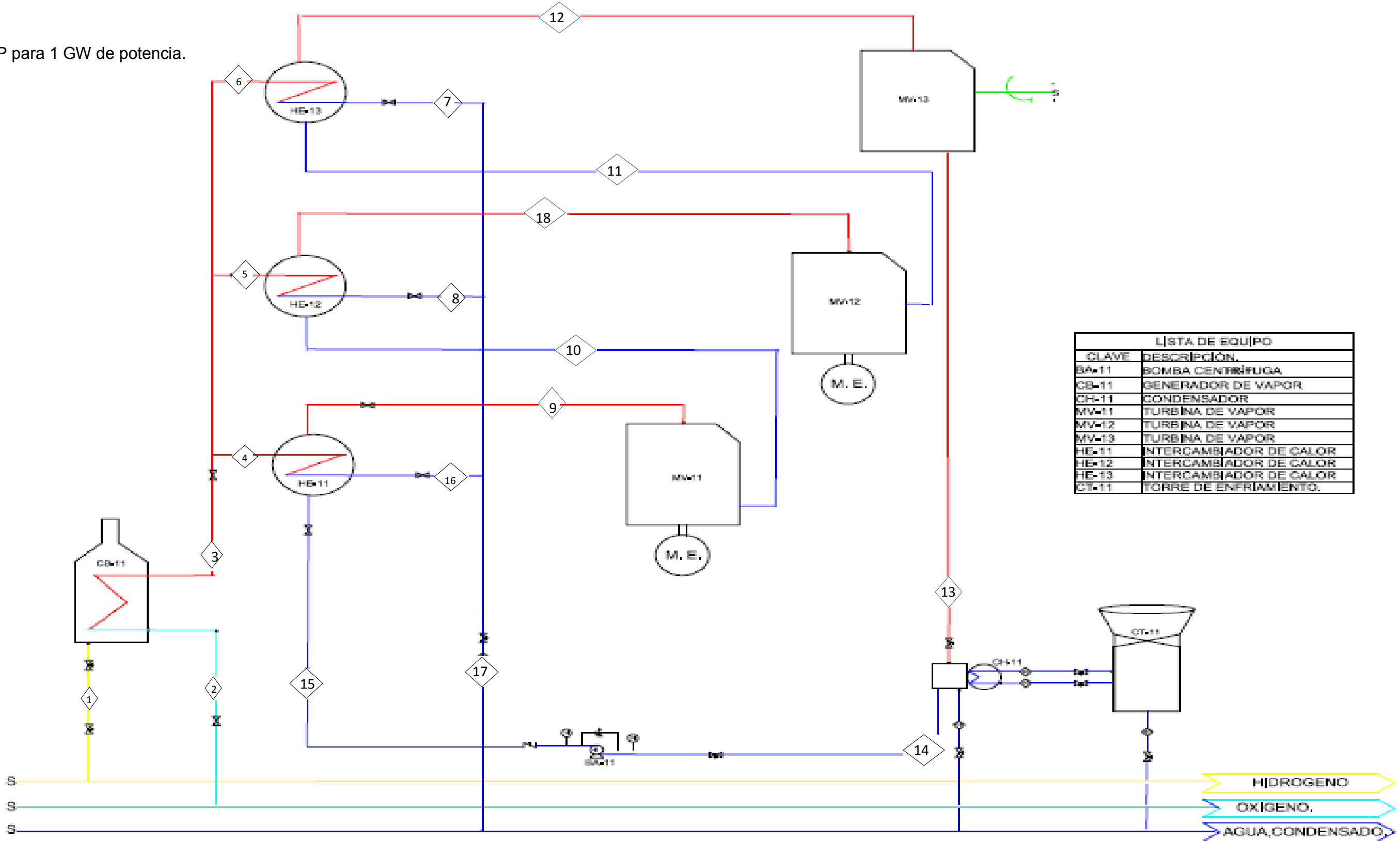
corrientes	m (Kg/S)	m (Kgmol/S)	P (bar)	T (°C)
1	150.41	8.348962042	250	25
2	18.80	1.043620255	250	25
3	169.21	9.392582297	250	3000
4	104.495	5.800340755	250	3000
5	34.041	1.889545026	250	3000
6	30.776	1.708338035	250	3000
7	30.776	1.708338035	250	150
8	34.041	1.889545026	250	150
9	412	22.88158418	250	600
10	412	22.88158418	30	260
11	412	22.88158418	4	260
12	412	22.88158418	4	600
13	412	22.88158418	0.04	29
14	412	22.88158418	0.04	29
15	412	22.88158418	250	29
16	104.495	5.800340755	250	150
17	169.21	9.392582297	250	150
18	412	22.88158418	30	600

Los valores de las corrientes 1 y 2 fueron calculados a mano. Los valores de la corriente 3 son los valores de entrada para cada simulación y el resto de las corrientes fueron arrojadas por el simulador PRO II.

Los valores para las turbinas o expansores necesarios para este proceso el simulador nos da:

Nombre del expansor		EX1	EX2	EX3
Descripción del expansor				
Presión de entrada	BAR	250	30	4
Presión de salida	BAR	30	4	0.0451
Temperatura de salida	C	621.3849	512.8315	54.6597
Trabajo actual	HP	404166.563	328859.031	1339994.63

DFP para 1 GW de potencia.



LISTA DE EQUIPO	
CLAVE	DESCRIPCIÓN.
BA-11	BOMBA CENTRÍFUGA
CB-11	GENERADOR DE VAPOR.
CH-11	CONDENSADOR
MV-11	TURBINA DE VAPOR
MV-12	TURBINA DE VAPOR
MV-13	TURBINA DE VAPOR
HE-11	INTERCAMBIADOR DE CALOR
HE-12	INTERCAMBIADOR DE CALOR
HE-13	INTERCAMBIADOR DE CALOR
CT-11	TORRE DE ENFRÍAMENTO.

BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA UN CICLO DE POTENCIA DE 1 GW																			
Componente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Masa (kg/s)
Energía (MW)

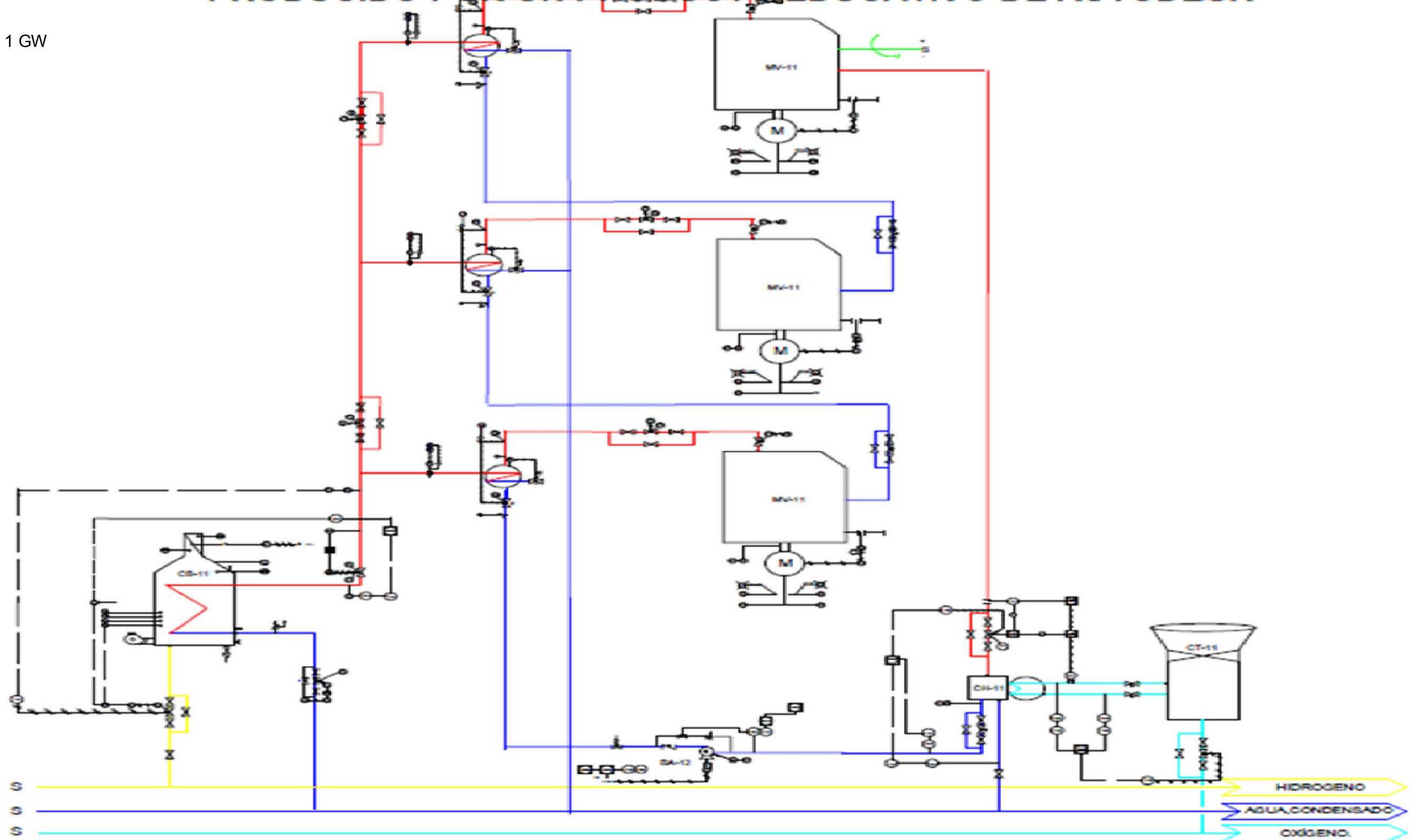
EMPRESA:	PROYECTO:	VERSIÓN:
UNIV. HUELVA	CICLO RANKINE PARA 1 GW	V. 01.
FECHA:	LABORIO:	SUPERVISOR:
23 DE NOVIEMBRE DE 2010.	LABORIO DE ENERGÍA RENOVABLE	DR. RAFAEL GARCÍA




PRODUCIDO POR UN PRODUCTO EDUCATIVO DE AUTODESK

PRODUCIDO POR UN PRODUCTO EDUCATIVO DE AUTODESK

DTI para 1 GW



	EMPRESA:	PROYECTO:	VERSION:
	FECHA:	ELABORADO:	SUPERVISOR:
	UNIV PERU S.A.S.	Ciclo Rankine para 1 GW	V. 0.1
	18 DE DICIEMBRE DE 2013	INGENIERO DOMINGO CHU VIGTEN	ING. NARVAL BACHENORICO

PRODUCIDO POR UN PRODUCTO EDUCATIVO DE AUTODESK

Para 100 MW de potencia el valor de las corrientes son:

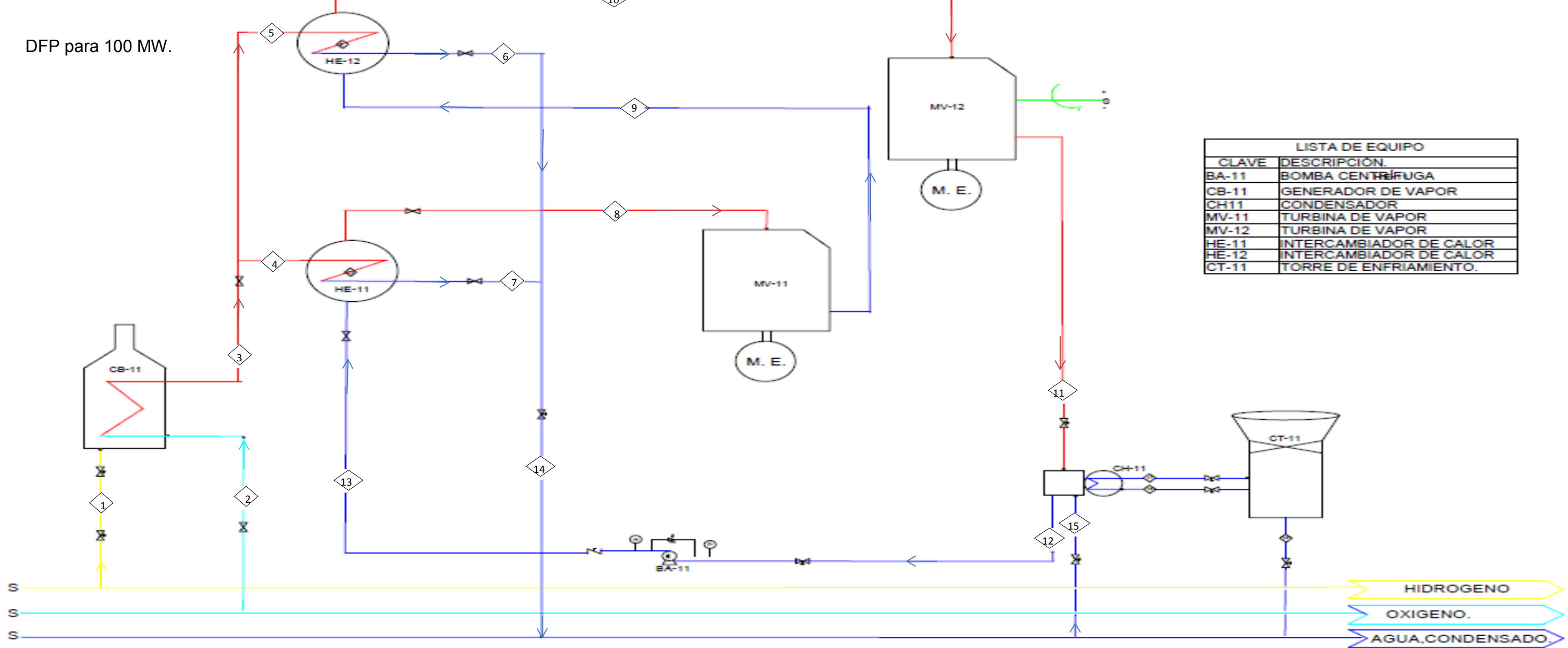
corrientes	m(kg/s)	m(kgmol/s)	T(°C)	P(bar)
1	15.04088889	0.834896204	25	250
2	1.880111111	0.104362026	25	250
3	16.921	0.93925823	3000	250
4	10.44394642	0.579727122	3000	250
5	6.477053584	0.359531108	3000	250
6	6.477053584	0.359531108	150	250
7	10.44394642	0.579727122	150	250
8	41.2	2.286947525	600	250
9	41.2	2.286947525	430	4
10	41.2	2.286947525	260	30
11	41.2	2.286947525	29	0.04
12	41.2	2.286947525	29	0.04
13	41.2	2.286947525	29	250
14	16.921	0.93925823	150	250

Los valores para las turbinas o expansores necesarios para este proceso el simulador arrojan los siguientes resultados:

Nombre del expansor		EX1	EX2
Descripción del expansor			
Presión de entrada	BAR	250	30
Presión de salida	BAR	40	0.0451
Temperatura de salida	C	450	29.697
Trabajo actual	HP	6629.2951	13410.606

PRODUCIDO POR UN PRODUCTO EDUCATIVO DE AUTODESK

DFP para 100 MW.



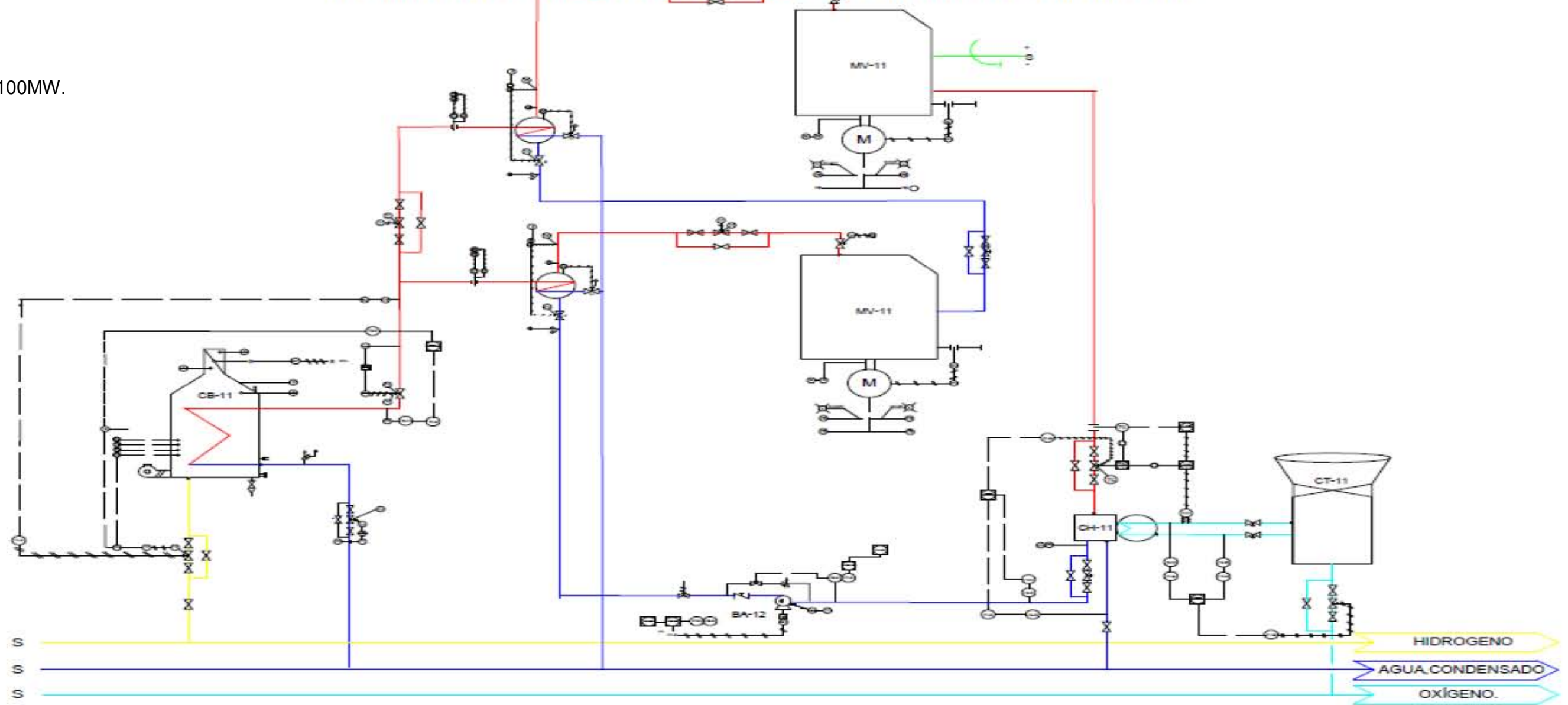
LISTA DE EQUIPO	
CLAVE	DESCRIPCIÓN
BA-11	BOMBA CENTRIFUGA
CB-11	GENERADOR DE VAPOR
CH-11	CONDENSADOR
MV-11	TURBINA DE VAPOR
MV-12	TURBINA DE VAPOR
HE-11	INTERCAMBIADOR DE CALOR
HE-12	INTERCAMBIADOR DE CALOR
CT-11	TORRE DE ENFRIAMIENTO.

BALANCE DE MASA Y ENERGIA PARA UN CICLO DE POTENCIA RANKINE DE 100MW

CORRIENTE/ PROPIEDADES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
FLUJO m(KG/s)	15.9409	1.8801	15.9210	10.4429	5.4771	5.4771	10.4429	41.2000	41.2000	41.2000	41.2000	41.2000	41.2000	15.9210
PRESIÓN(bar)	250	250	250	250	250	250	250	250	4	30	0.0400	0.0400	250	250
TEMPERATURA(°C)	25	25	3000	3000	3000	150	150	600	430	250	29	29	29	150
FASE	gas	gas	vapor	vapor	vapor	vapor	vapor	vapor	vapor	vapor	liquido	liquido	liquido	vapor

EMPRESA: UNAM PSEZ	PROYECTO: CICLO RANKINE PARA 100MW	VERSIÓN: V. 0.1.
FECHA: 16 DE NOVIEMBRE DE 2013.	ELABORÓ: GONZÁLEZ DOMÍNGUEZ CINTLIYATZIN	SUPERVISOR: IQ. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO.

DTI para 100MW.



	EMPRESA:	UNAM FES ZARAGOZA	PROYECTO:	CICLO RANKINE PARA 100MW	VERSIÓN:	V. D.E.
	FECHA:	19 DE DICIEMBRE DE 2013	ELABORÓ:	GONZÁLEZ DOMÍNGUEZ CINTLI YOAQUIN	SUPERVISOR:	IQ. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO
	PRODUCIDO POR UN PRODUCTO EDUCATIVO DE AUTODESK					

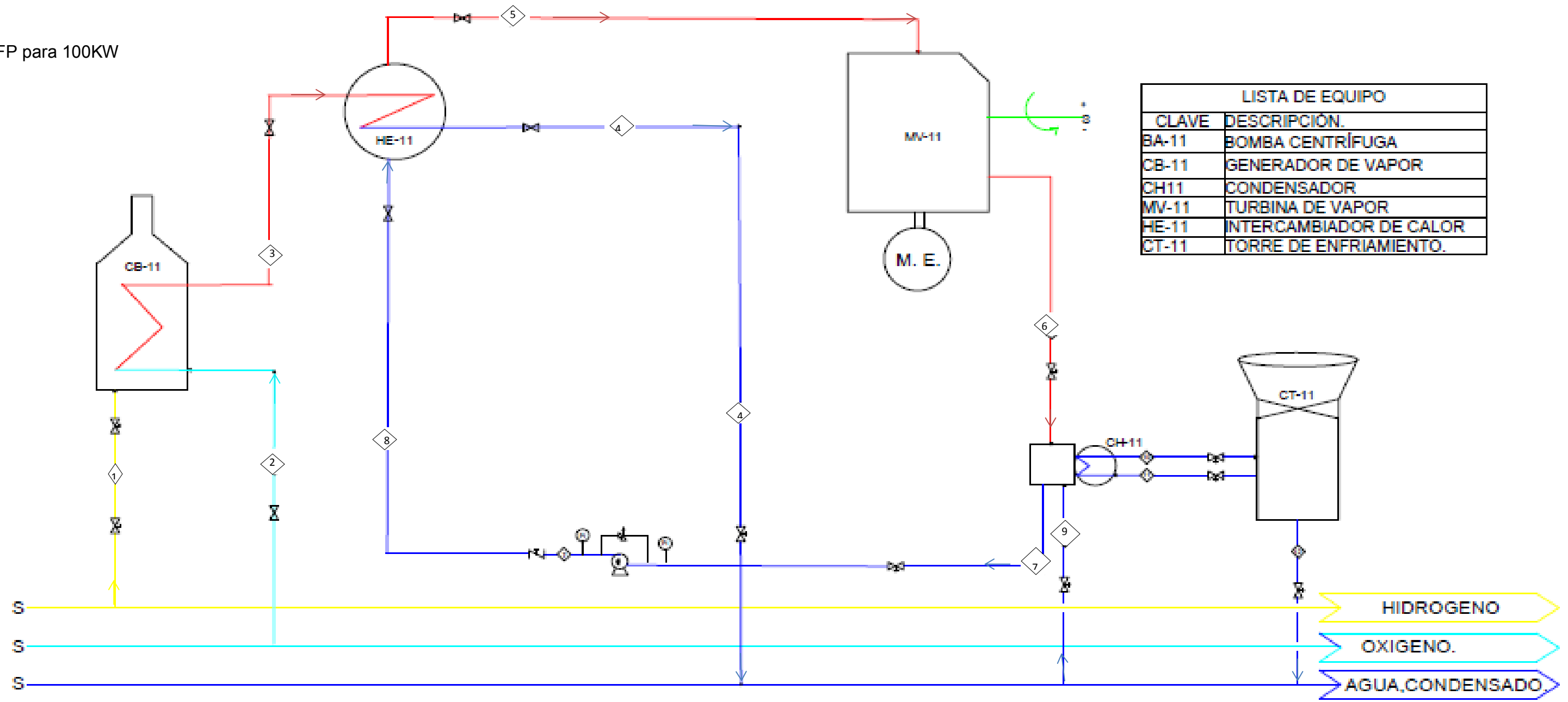
Para 100 KW de potencia.

Corrientes	m (kg/s)	m (g/s)	m(gmol/S)	T(°C)	P(bar)
1	0.015040889	15.0408889	0.834896205	25	25
2	0.001880111	1.88011111	0.104362025	25	25
3	0.016921	16.921	0.93925823	3000	149.954
4	0.016921	16.921	0.93925823	134.83	134.83333
5	0.0412	41.2	2.286947525	720	94.6666
6	0.0412	41.2	2.286947525	29	3.404113
7	0.0412	41.2	2.286947525	29	3.404113
8	0.0412	41.2	2.286947525	29	134.83333

Los valores para las turbinas o expansores necesarios para este proceso el simulador arrojan los siguientes resultados:

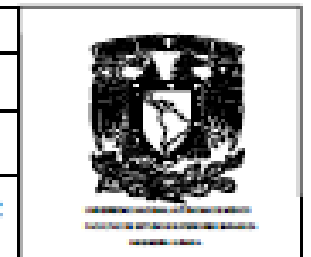
Nombre del expansor	EX1	
Descripción del expansor		
Presión de entrada	BAR	94.6666
Presión de salida	BAR	3.404113
Temperatura de salida	C	29
Trabajo actual	HP	134.102006

DFP para 100KW

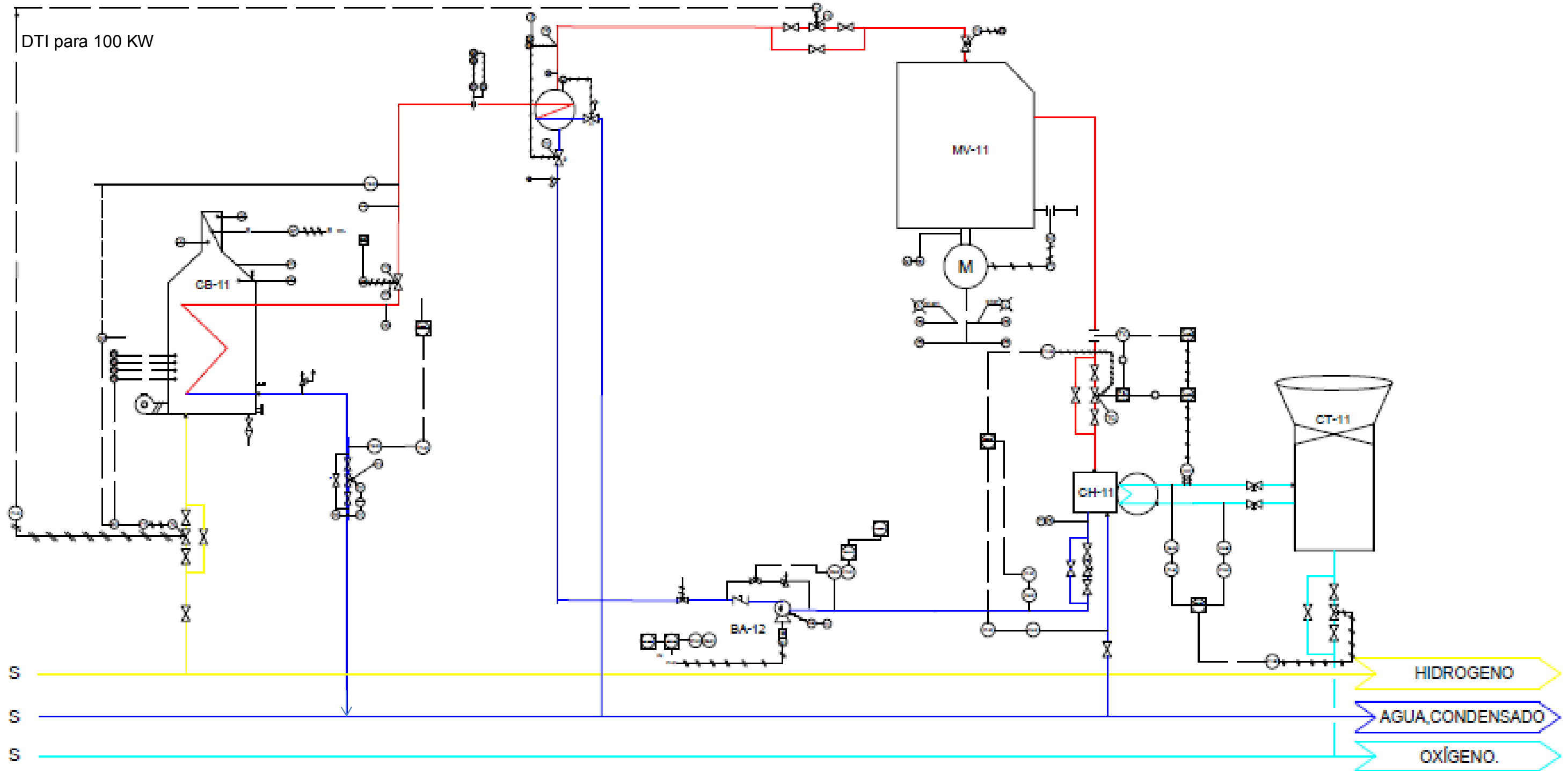



CONDICIÓN PROYECTADA	1	2	3	4	5	6	7	8
Flujo masa	15.5408859	1.8801	16.9210	16.9210	41.2000	41.2000	41.2000	41.2000
Flujo energía	25	25	149.9540	124.8333	84.8888	3.4041	3.4041	124.8333
Temperatura (°C)	25	25	3000	124.8300	720	29	29	29
fase	gas	gas	vapor	vapor	vapor	líquido	líquido	líquido

EMPRESA:	PROYECTO:	VERSIÓN:
UNAM PFCZ	CICLO RANKINE PARA 100KW	V. D.L.
FECHA:	ELABORÓ:	SUPERVISOR:
06 DE NOVIEMBRE DE 2013.	GONZÁLEZ DOMÍNGUEZ CINTILYUATZIN	IQ. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO.



DTI para 100 KW



 <p>UNAM FES ZARAGOZA</p>	EMPRESA:	PROYECTO:	VERSIÓN:
	UNAM FES ZARAGOZA	CICLO RANKINE PARA 100KW	V. 0.1.
	FECHA:	ELABORÓ:	SUPERVISOR:
19 DE DICIEMBRE DE 2013.	GONZÁLEZ DOMÍNGUEZ CINTLI YOATZIN	ID. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO	

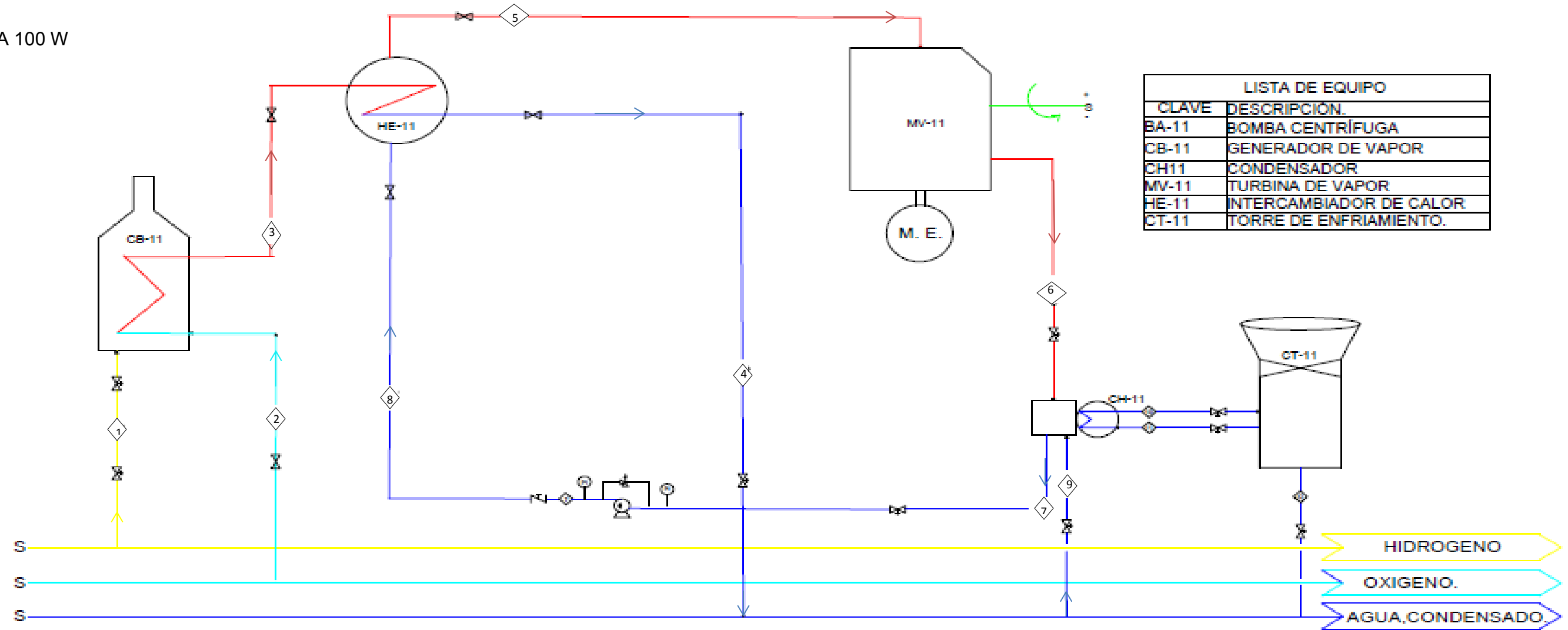
Para 100 W

corrientes	m (kg/s)	m (g/s)	m(gmol/s)	T(°C)	P (bar)
1	1.50409E-05	0.01504089	0.0008349	25	11.7
2	1.88011E-06	0.00188011	0.00010436	25	11.7
3	0.000016921	0.016921	0.00093926	3000	12.69
4	0.000016921	0.016921	0.00093926	66.7066	12.69
5	0.0000412	0.0412	0.00228695	696.55174	5.576986
6	0.0000412	0.0412	0.00228695	29	0.0034041
7	0.0000412	0.0412	0.00228695	29	0.0034041
8	0.0000412	0.0412	0.00228695	29	5.576986

Los valores para las turbinas o expansores necesarios para este proceso el simulador arrojan los siguientes resultados:

Nombre del expansor	EX1	
Descripción del expansor		
Presión de entrada	BAR	5.576986
Presión de salida	BAR	0.0034041
Temperatura de salida	C	29
Trabajo actual	HP	0.13410201

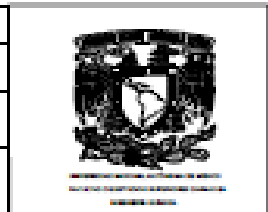
DFP PARA 100 W

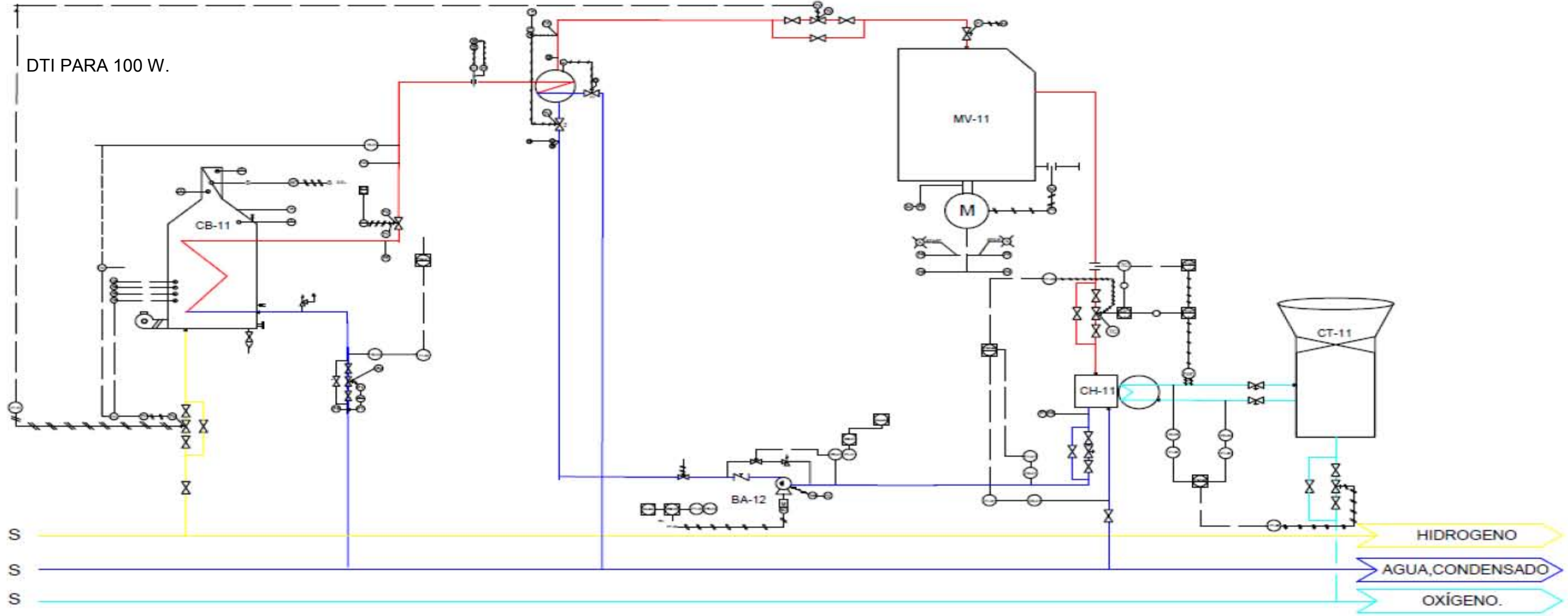



BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA UN CICLO DE POTENCIA RANKINE DE 100W

CORRIENTE/ PROPIEDADES	1	2	3	4	5	6	7	8
FLUJO (kg/h)	0.0190	0.0019	0.0190	0.0190	0.0412	0.0412	0.0412	0.0412
PRESIÓN(bar)	11.7000	11.7000	12.0900	12.0900	0.5770	0.0034	0.0034	0.0034
TEMPERATURA(°C)	25	25	300	66.7090	66.5517	29	29	29
FASE	gas	gas	vapor	vapor	vapor	vapor	vapor	vapor

EMPRESA:	PROYECTO:	VERSIÓN:
UNAM FROZ	CICLO RANKINE PARA 100W	V. 0.1.
FECHA:	ELABORÓ:	SUPERVISOR:
06 DE NOVIEMBRE DE 2013.	GONZÁLEZ DOMÍNGUEZ CINTLIYATZIN	IQ. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO.





 <p>UNAM FES ZARAGOZA</p>	EMPRESA:	PROYECTO:	VERSIÓN:
	UNAM FES ZARAGOZA	CICLO RANKINE PARA 100W	V. 0.1.
	FECHA:	ELABORÓ:	SUPERVISOR:
19 DE DICIEMBRE DE 2013.	GONZÁLEZ DOMÍNGUEZ CINTLI YOATZIN	IQ. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO	

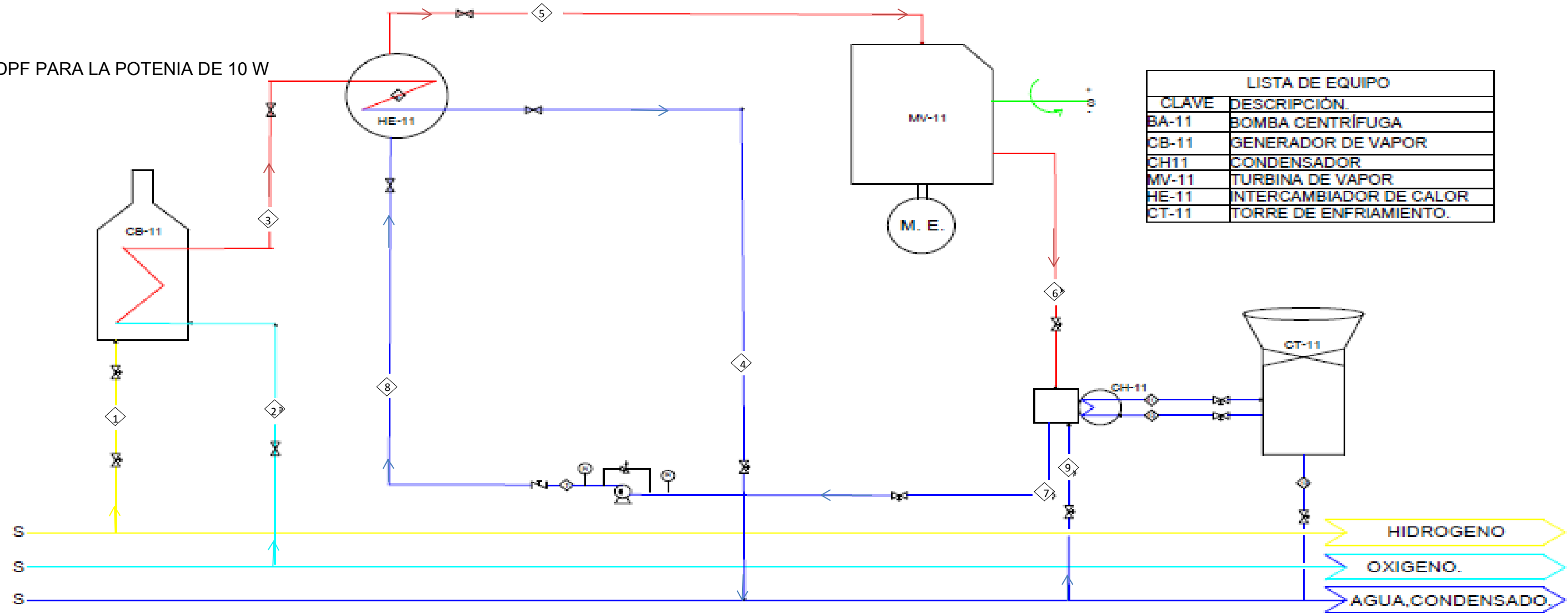
Para 10 W

corrientes	m (kg/s)	m(g/s)	m(gmol/s)	T(°C)	P (bar)
1	1.50409E-06	0.00150409	8.34896E-05	25	8.1249
2	1.88011E-07	0.00018801	1.04362E-05	25	8.1249
3	1.6921E-06	0.0016921	9.39258E-05	3000	9.6
4	1.6921E-06	0.0016921	9.39258E-05	74.166	9.6
5	0.00000412	0.00412	0.000228695	666.666	3.88567
6	0.00000412	0.00412	0.000228695	29	0.00039979
7	0.00000412	0.00412	0.000228695	29	0.00039979
8	0.00000412	0.00412	0.000228695	29	3.88567

Los valores para las turbinas o expansores necesarios para este proceso el simulador arroja los siguientes resultados:

Nombre del expansor	EX1	
Descripción del expansor		
Presión de entrada	BAR	3.88567
Presión de salida	BAR	0.00039979
Temperatura de salida	C	29
Trabajo actual	HP	0.013410201

DPF PARA LA POTENCIA DE 10 W

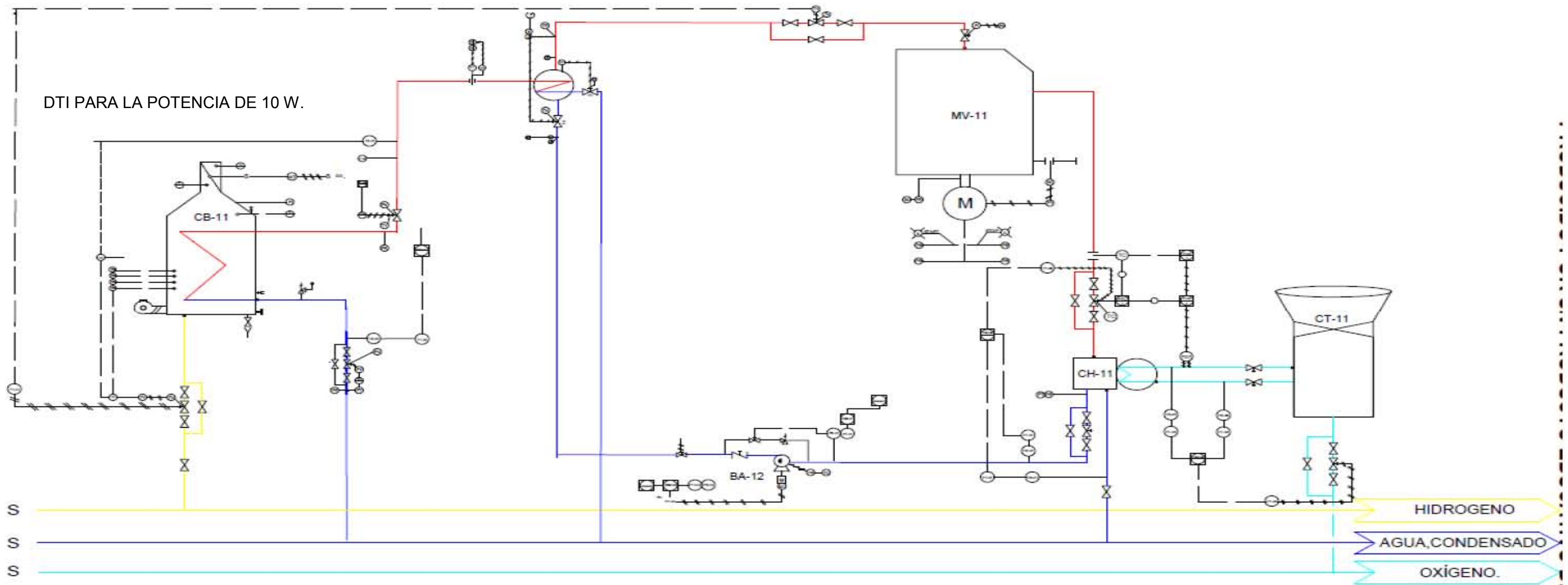



LISTA DE EQUIPO	
CLAVE	DESCRIPCIÓN
BA-11	BOMBA CENTRÍFUGA
CB-11	GENERADOR DE VAPOR
CH-11	CONDENSADOR
MV-11	TURBINA DE VAPOR
HE-11	INTERCAMBIADOR DE CALOR
CT-11	TORRE DE ENFRIAMIENTO.

BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA UN CICLO DE POTENCIA RANKINE DE 10W								
CORRIENTE/ PROPIEDADES	1	2	3	4	5	6	7	8
FLUJO (mg/s)	0.0015	0.0002	0.0017	0.0017	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041
PRESIÓN(bar)	0.1249	0.1249	0.0000	0.0000	3.0857	0.0004	0.0004	3.0857
TEMPERATURA(°C)	25	25	3000	24.1080	666.0000	29	29	29
FASE	gas	gas	vapor	vapor	vapor	vapor	vapor	vapor

EMPRESA:	PROYECTO:	VERSIÓN:
UNAM FESZ	CICLO RANKINE PARA 10W	V. 0.1
FECHA:	ELABORÓ:	SUPERVISOR:
06 DE NOVIEMBRE DE 2013.	GONZÁLEZ DOMÍNGUEZ CINTHYA TATZIN	IQ. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO.





 <p>UNAM FES ZARAGOZA</p>	EMPRESA:	PROYECTO:	VERSION:
	UNAM FES ZARAGOZA	CICLO RANKINE PARA 10W	V. 0.1.
	FECHA:	ELABORÓ:	SUPERVISOR:
19 DE DICIEMBRE DE 2013.	GONZÁLEZ DOMÍNGUEZ CINTLI YOATZIN	IQ. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO	

Comparando los resultados obtenidos manualmente y los obtenidos por el simulador PRO II para 1 GW de potencia obtenemos una por ciento de error del 1.146887751%.

Cálculos a mano.

corrientes	m (Kg/S)	P (bar)	T (°C)	h (KJ/ kg)
1	150.41	250	25	271.31
2	18.80	250	25	4234.00
3	169.21	250	3000	13333.33
4	104.495	250	3000	13333.33
5	34.041	250	3000	13333.33
6	30.776	250	3000	13333.33
7	30.776	250	150	647.20
8	34.041	250	150	647.20
9	412	250	600	3490.40
10	412	30	260	2885.0
11	412	4	260	2984.0
12	412	4	600	3703.0
13	412	0.04	29	2553.5
14	412	0.04	29	121.0
15	412	250	29	148.0
16	104.495	250	150	647.2
17	169.21	250	150	647.2
18	412	30	600	3682.0

Resultados del simulador PRO II

corrientes	m (Kg/S)	m (Kgmol/S)	P (bar)	T (°C)
1	150.41	8.348962042	250	25
2	18.80	1.043620255	250	25
3	169.21	9.392582297	250	3000
4	104.495	5.800340755	250	3000
5	34.041	1.889545026	250	3000
6	30.776	1.708338035	250	3000
7	30.776	1.708338035	250	150
8	34.041	1.889545026	250	150
9	412	22.88158418	250	600
10	412	22.88158418	30	260
11	412	22.88158418	4	260
12	412	22.88158418	4	600
13	412	22.88158418	0.04	29
14	412	22.88158418	0.04	29
15	412	22.88158418	250	29
16	104.495	5.800340755	250	150
17	169.21	9.392582297	250	150
18	412	22.88158418	30	600

Conclusiones.

El tipo de ciclo planteado en esta tesis, resulta muy interesante como una alternativa óptima para la generación de energía limpia, ecológica, económica, responsable con el medio ambiente y sobre todo con una reacción naturalmente reversible como lo es el ciclo físico-químico del agua.

El ciclo Rankine fue adaptado para utilizar hidrógeno y oxígeno obtenidos por el rompimiento de las moléculas del agua mediante la electrólisis, se hizo reaccionar para obtener vapor de agua a altas temperaturas, la flama del hidrógeno puede ser controlada mediante el diseño cinético del intercambiador de calor de tal manera que los materiales con el que está construido este, nunca alcanzaran las mismas temperaturas.

Este vapor entra al ciclo de potencia Rankine simulado en el software PRO II.

El simulador es un software integral de procesos, es un simulador de estado estacionario que posibilita un análisis operacional y de diseño de procesos. Está diseñado para realizar cálculos de equilibrio de energía y masa para hidrocarburos y su amplia variedad de procesos químicos para compuestos orgánicos. Ofrece a las industrias de procesamiento de sólidos, gas natural, petróleos, hidrocarburos y polímeros la solución de simulación de procesos más integral disponible pero para este tipo de procesos renovables y limpios, en dónde no se utiliza ningún tipo de hidrocarburo o compuesto de petróleo no es muy funcional, ya que los equipos están prediseñados para los hidrocarburos y no para otro tipo de combustibles renovables, no fósiles.

Por esta razón el ciclo de potencia Rankine se simuló a partir de la salida del vapor de agua, afortunadamente el software nos simuló las potencias que se sugeridas en este trabajo y dio las condiciones de las corrientes para cada una de las potencias.

Este proyecto ofrece alternativas, esta propuesta es viable para la generación de vapor y a su vez de energía eléctrica limpia, renovable e inagotable y la cual es capaz de proporcionar agua como subproductos.

Lista de figuras.

FIGURA 1. 1 Energía Eólica	13
FIGURA 1.2 Radiación solar	13
FIGURA 1.3 Energía Geotérmica.	14
FIGURA 1.4 Biomasa.	14
FIGURA 1.5 Energía Hidroeléctrica.	14
FIGURA 1.6 Energía Oceanomotriz.	14
FIGURA 1.7 Energía y el hombre.....	15
FIGURA 1.8 Energías del siglo xxi.....	16
FIGURA 1.9 El sol.....	21
FIGURA 1.10 Energía eólica (aerogeneradores).....	24
FIGURA 1.11 Plantas colectoras de sol.....	25
FIGURA 1.12 Biomasa.....	26
FIGURA 1.13 Energía geotérmica.....	27
FIGURA 1.14 Tipos de energía geotermica.....	28
FIGURA 1.15 Transformación de la energía.	30
FIGURA 1.16 Energía hidráulica.....	31
FIGURA 1.17 Energía nucleoelectrica.....	32
FIGURA 1.18 Energía oceanomotriz.....	33
FIGURA 1.19 Oleaje.....	36
FIGURA 1.20 Bufadora..	37
FIGURA 1.21 Simulación de una bufadora..	38
FIGURA 2. 1 Sistema energético mexicano..	41
FIGURA 2. 2 Energía per cápita mundial..	42
FIGURA 3. 1 Electricidad quemando hidrocarburos..	55
FIGURA 3. 2 Generación de energía eléctrica utilizando agua.	56
FIGURA 3. 3 Transformación de la energía potencial del agua en energía eléctrica.	57
FIGURA 3. 4 Hibridación de las energías renovables en las costas.....	59
FIGURA 3. 5 Prototipo de una celda de electrolisis para sistemas híbridos.....	60
FIGURA 3. 6 Diagrama de flujo de proceso del ciclo Rankine integrado al ciclo físico-químico del agua.....	62
FIGURA 4. 1 Ciclo de Potencia básico.....	65
FIGURA 4. 2Ejecución de un ciclo de Carnot en un sistema cerrado.	67
FIGURA 4. 3Ciclo de potencia Rankine.....	68
FIGURA 4. 4 Diagrama T-S, efecto de la reducción de la presión del condensador.....	72
FIGURA 4. 5 Diagrama T-s El efecto de aumentar la presión de la caldera.....	73
FIGURA 4. 6 Diagrama T-S para el efecto del sobrecalentamiento del vapor.	75
FIGURA 4. 7 Ciclo de potencia Rankine con efecto de recalentamiento	77

FIGURA 4. 8 Diagrama T-S para el efecto de recalentamiento.....	77
FIGURA 4. 9 Esquema de instalación y diagrama T-S de un ciclo de potencia de vapor ideal regenerativo con calentador abierto de alimentación..	79
FIGURA 4. 10 Esquema de instalación y diagrama T-S de un ciclo de potencia de vapor ideal regenerativo con calentador cerrado de alimentación.	81
FIGURA 4. 11 Esquema de un calentador cerrado de agua de alimentación a) bombea directamente el condensado hacia la línea de alimentación de la caldera y b) atrapa (por estrangulamiento) el vapor condensado y lo lleva a una zona de menor presión..	82
FIGURA 4. 12 Diagrama de flujo de proceso de cogeneración.....	84
FIGURA 4. 13 Diagrama de trigeneración.....	87
FIGURA 4. 14 Sistema de trigeneración..	88
FIGURA 5. 1 Hidrógeno.....	91
FIGURA 5. 2 Tipo de electrolizadores.....	106
FIGURA 5. 3 Diagrama de tubería e instrumentación de la electrólisis alcalina.	109
FIGURA 5. 4 Compresor de pistón recíprocante.....	110
FIGURA 5.5 Compresor Radial.	111
FIGURA 5. 6 Compresor axial.....	112
FIGURA 5.7 Tanque de hidrogeno liquido LINE.	115
FIGURA 5. 8 Tanques de almacenamiento.....	117
FIGURA 5 9 Microesferas de vidrio.	119
FIGURA 6. 1 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CICLO RANKINE PARA 10 W, 100 W y 100KW DE POTENCIA.	114
FIGURA 6. 2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CICLO RANKINE PARA 100 MW.....	125
FIGURA 6.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CICLO RANKINE PARA 1 GW	116
FIGURA 6. 4 Diagrama del simulador PRO II para 1 GW	129
FIGURA 6. 5 Diagrama del simulador PRO II para 100 MW.....	131
FIGURA 6. 6 Diagrama del simulador PRO II para 100 KW	133
FIGURA 6.7 Diagrama del simulador PRO II para 100 W.....	134
FIGURA 6. 8 Diagrama del simulador PRO II para 100 W	136
FIGURA 6.9 Quemador para hidrogeno.	138

Lista de gráficas.

GRÁFICA 1. 1 EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE HIDROCARBUROS.....	18
GRÁFICA 1.2 PRODUCCION DEL PETRÓLEO DESDE EL AÑO 1850 HASTA 2200.....	20
GRÁFICA 2. 1 Gráfica del nivel de consumo de energía de 1930 a 2005	44
GRÁFICA 2. 2 Esquema del consumo de energía en el año 2010 según edro.	45
GRÁFICA 2. 3 Consumo de energía de uso final..	46

GRÁFICA 2. 4 Escenario de emisiones.....	47
GRÁFICA 2. 5 Emisiones 2011.....	47
GRÁFICA 2. 6 Impacto de las medidas de mitigación.....	48

Lista de tablas.

TABLA 5. 1 Características generales.....	92
TABLA 5. 2 Propiedades periódicas.....	93
TABLA 5. 3 Energía por unidad de volumen.....	93
TABLA 5. 4 Propiedades del hidrógeno.....	95

Tabla 6. 1 Valores para las corrientes según el simulador PRO II para la capacidad de 1 GW de potencia.....	130
Tabla 6. 2 Valores que arroja el simulador PRO II para las turbinas en el ciclo de 1 GW.....	130
Tabla 6. 3 Valores para las corrientes según el simulador PRO II para la capacidad de 100 MW de potencia.....	131
Tabla 6. 4 Valores que arroja el simulador PRO II para las turbinas en el ciclo de 100 MW.....	132
Tabla 6. 5 Valores para las corrientes según el simulador PRO II para la capacidad de 100 KW de potencia.....	133
Tabla 6. 6 Valores que arroja el simulador PRO II para las turbinas en el ciclo de 100 KW.....	134
Tabla 6. 7 Valores para las corrientes según el simulador PRO II para la capacidad de 100 W de potencia.....	135
Tabla 6. 8 Valores que arroja el simulador PRO II para las turbinas en el ciclo de 100 W.....	135
Tabla 6. 9 Valores para las corrientes según el simulador PRO II para la capacidad de 10 W de potencia.....	136
Tabla 6. 10 Valores que arroja el simulador PRO II para las turbinas en el ciclo de 100 W.....	137
Tabla 6. 11 Lista de equipos.....	141

TABLA 7. 1 Balance de masa para 1 GW.....	143
TABLA 7. 2 Balance de energía para 1 GW.....	143
TABLA 7. 3 Condiciones de las corrientes. Tabla de propiedades.....	145
TABLA 7. 4 Balance de masa para 100 MW de potencia.....	146
TABLA 7. 5 Balance de energía para 100 MW de potencia.....	146
TABLA 7. 6 Balance de energía para 100 KW.....	147
TABLA 7. 7 Balance de energía para 100 KW.....	147
TABLA 7. 8 Balance de masa para 100 W.....	147
TABLA 7. 9 Balance de energía para 100 W.....	148
TABLA 7. 10 Balance de masa para 10 W.....	148
TABLA 7.11 Balance de energía para 10 W.....	148

Nomenclatura.

HNO₃ ácido nítrico

H₂SO₄ ácido sulfúrico

AIE agencia internacional de energía

H₂O agua

A área

atm atmosférico

NaBH₄ BOROHI DRURO DE SODIO

CVM calidad de vida material

Q calor

ΔEp cambio de la energía potencial

MCFC celdas de combustible de carbonato fundido

SOFC celdas de combustible de óxidos sólidos

Co cobalto

F constante de Faraday

ρ densidad KG/m³

DFP diagrama de flujo de procesos

Δh diferencia de altura

CO₂ dióxido de carbono

η Carnot eficiencia de Carnot

η ter eficiencia térmica

PEM electrolito de membrana polimérica

E energía

Ec energía cinética KJ/Kg

E energía en KJ

Ep energía potencial KJ/Kg

he entalpia de entrada

hs entalpia de salida

S	entropía total KJ/K
GEI	gases de efecto invernadero
GW	giga watt
°C	grados centígrados
g	gravedad m/s^2
NaBO ₂	hidrato de meta borato de sodio
H ₂	hidrogeno
KOH	hidróxido de potasio
Fe	hierro
h	horas
s	isotrópico
KW	kilo watt
m	masa en Kg
M	masa molar kg/kmol
MW	mega watt
C ₇ H ₁₄	metil ciclo hexano
Ni	níquel
n	número de moles
NiO	oxido de níquel
O ₂	oxigeno
P	población mundial
P	Potencia hidrodinámica
v	potencial eléctrico
P	Presión
Σ	Sumatoria
T	temperatura
C ₇ H ₈	tolueno
Wentrada	trabajo de entrada

W turbina	trabajo de la turbina
W _{turb,sal}	trabajo de la turbina a la salida
W _{salida}	trabajo de salida
W neto	trabajo neto
q entrada	Transferencia de calor a la entrada KJ/Kg
q salida	Transferencia de calor a la salida KJ/Kg
q recalentamiento	Transferencia de calor para recalentamiento
v	vapor de agua
u	velocidad del flujo m/s

Glosario.

PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

IEA: Agencia Internacional de Energía.

Fotovoltaica: energía solar que produce electricidad.

Aerogeneradores: generador eléctrico.

CFE: Comisión Federal de Electricidad.

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México

Bufadora: Geiser

Blowjet: Conducto cerrado en el que, al estar totalmente confinadas, las olas se convierten en un flujo que va aumentando su velocidad en el interior del dispositivo. El resultado final es un chorro intermitente a la salida con una velocidad significativamente mayor que la que entró en el dispositivo.

IIE: Instituto de Investigación Eléctrica.

INE: Instituto Nacional de Ecología.

LEAP: Long-range Energy Alternatives Planning System (Sistema de largo alcance para la planificación de energías alternativas).

CVM: Calidad de Vida Material.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

AIE: Agencia Internacional de Energía.

Combustóleo: Aceite combustible residual derivado de la destilación del petróleo crudo.

Chan K'iiin: Pequeño sol en maya.

Isómero: Misma cantidad de átomos

Ata: Presión atmosférica absoluta.

Spin: Número cuántico que indica el giro del electrón.

MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell o celdas de combustible de carbonato fundido.

SOFC: Solid-Oxide Fuel Cell o celdas de combustible de óxido sólido.

SMR: Reformado de metano mediante vapor.

PEM: Electrolito de Membrana Polimérica.

Descentralizado: Es la libertad que tienen los administradores de los niveles operativos de la organización (subunidades) para tomar decisiones.

Centralización: Reunir varias cosas en un centro común o a hacer que distintas cosas dependan de un poder central.

CNT's: Nanotubos de carbono.

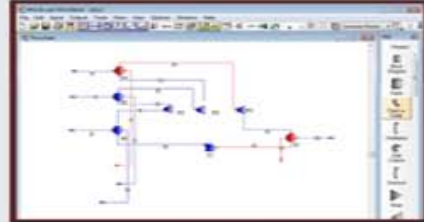
PEM: Pulso Electro Magnético.

Anexos.

A.1 Procedimiento para la utilización del simulador PRO II.

CONTENIDO.

- Simulación de procesos: PRO II
- Descripción de la interfaz grafica del simulador
- Procedimiento general para realizar la simulación.



PROCEDIMIENTO GENERAL PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN.

Los pasos básicos para llevar a cabo la simulación y obtener resultados son:

- 1.** Definir las unidades de medidas. Sistema métrico, ingles, internacional, etc.
- 2.** Seleccionar los componentes.
- 3.** Definir el método termodinámico a emplear. De acuerdo a las condiciones de trabajo y los componentes.

PROCEDIMIENTO GENERAL PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN.

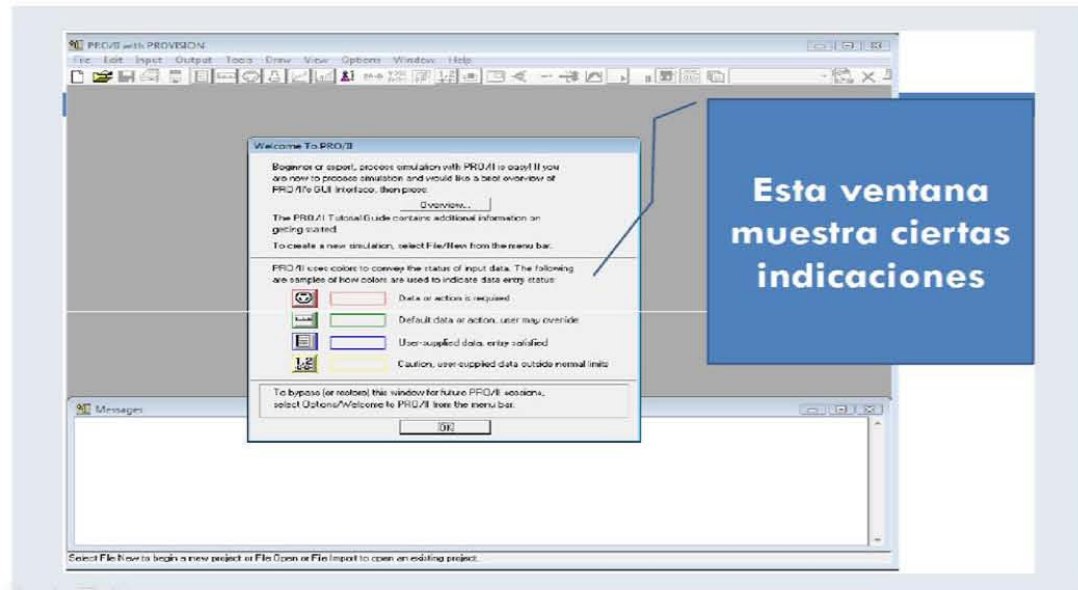
4. Construir el DFP, con base a: las corrientes involucradas y los equipos empleados en el proceso.
5. Proporcione las condiciones de las corrientes de proceso principalmente, y de los equipos.
6. Corra la simulación
7. Analice los resultados.

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

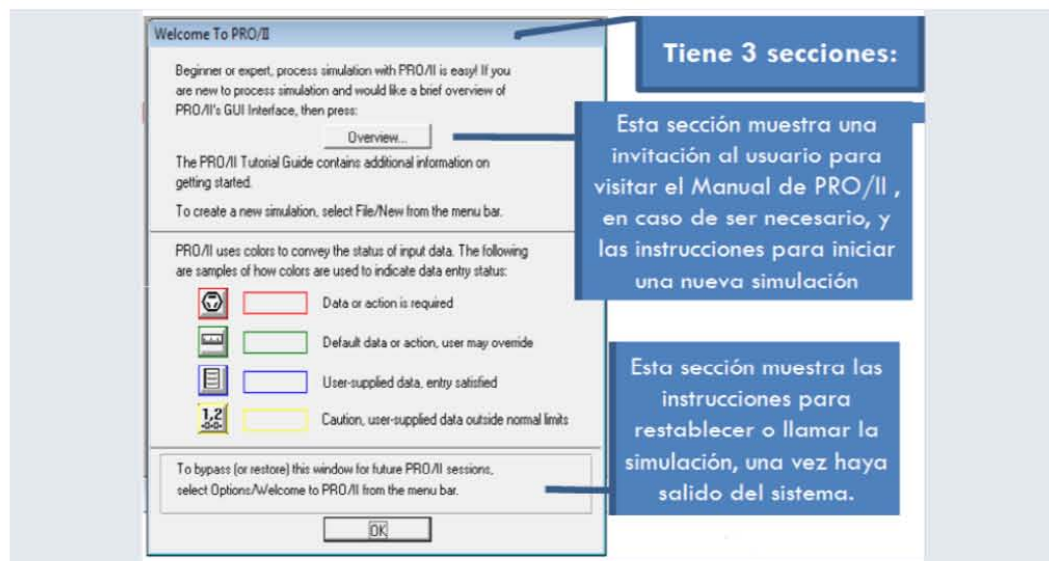
Al iniciar el programa aparece una pantalla como la siguiente:



DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.



DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.



DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

The screenshot shows the 'Welcome To PRO/II' dialog box. It contains the following text:

Beginner or expert, process simulation with PRO/II is easy! If you are new to process simulation and would like a brief overview of PRO/II's GUI Interface, then press:

The PRO/II Tutorial Guide contains additional information on getting started.

To create a new simulation, select File/New from the menu bar.

PRO/II uses colors to convey the status of input data. The following are samples of how colors are used to indicate data entry status:

	<input type="text" value=""/>	Data or action is required
	<input type="text" value=""/>	Default data or action, user may override
	<input type="text" value=""/>	User-supplied data, entry satisfied
	<input type="text" value=""/>	Caution, user-supplied data outside normal limits

To bypass (or restore) this window for future PRO/II sessions, select Options/Welcome to PRO/II from the menu bar.

Callouts from the right side of the image point to the dialog box and the color-coded boxes in the table:

- Esta sección muestra varias indicaciones sobre el uso del Simulador
- Los renglones que aparecen con un cuadro en color **ROJO**, requieren de un o varios datos para la simulación
- Los renglones que aparecen con un cuadro en color **Verde** son datos o acciones asignadas por default que pueden ser modificados

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

The screenshot shows the 'Welcome To PRO/II' dialog box, identical to the one above. It contains the following text:

Beginner or expert, process simulation with PRO/II is easy! If you are new to process simulation and would like a brief overview of PRO/II's GUI Interface, then press:

The PRO/II Tutorial Guide contains additional information on getting started.

To create a new simulation, select File/New from the menu bar.

PRO/II uses colors to convey the status of input data. The following are samples of how colors are used to indicate data entry status:

	<input type="text" value=""/>	Data or action is required
	<input type="text" value=""/>	Default data or action, user may override
	<input type="text" value=""/>	User-supplied data, entry satisfied
	<input type="text" value=""/>	Caution, user-supplied data outside normal limits

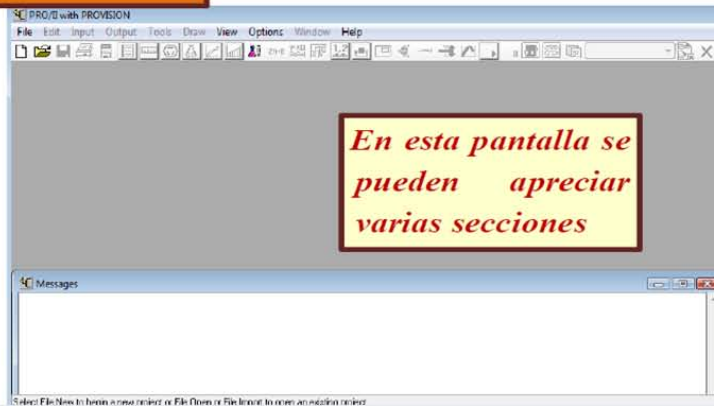
To bypass (or restore) this window for future PRO/II sessions, select Options/Welcome to PRO/II from the menu bar.

Callouts from the right side of the image point to the dialog box and the color-coded boxes in the table:

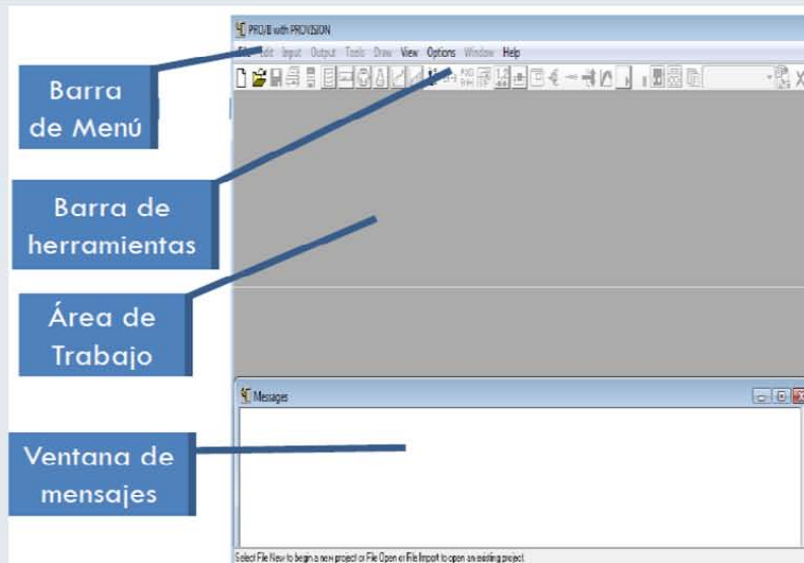
- Los renglones que aparecen con un cuadro en color **Azul**, son datos suministrados que son satisfactorios para el calculo
- Los renglones que aparecen con un cuadro en color **Amarillo**, son datos suministrados que estan fuera de los limites normales
- Para entrar en el programa, debe darle click en OK

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

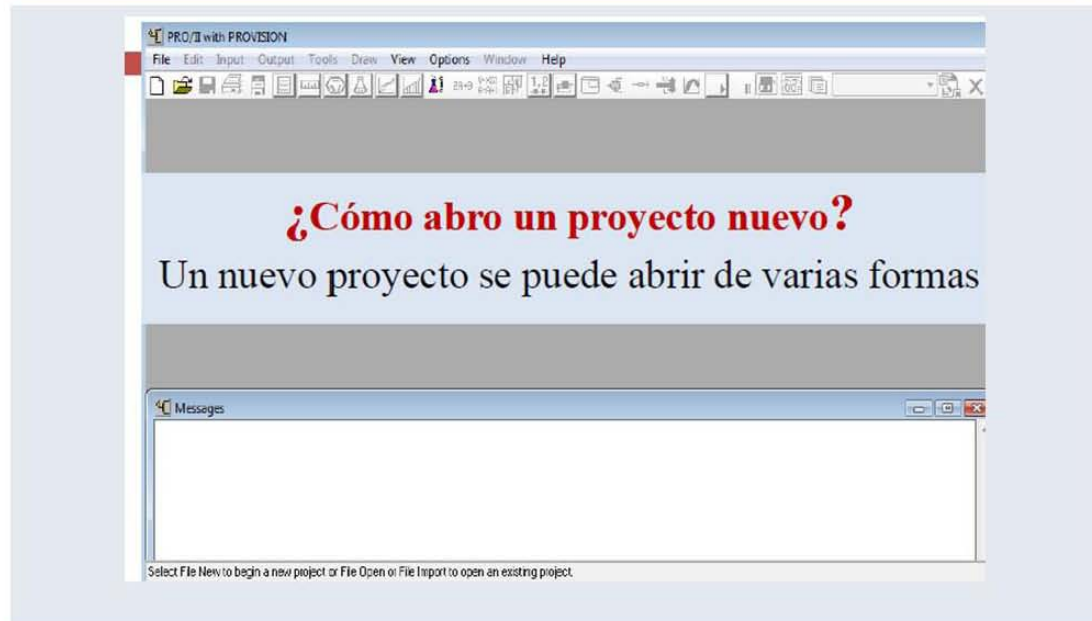
Luego aparece una pantalla como la siguiente:



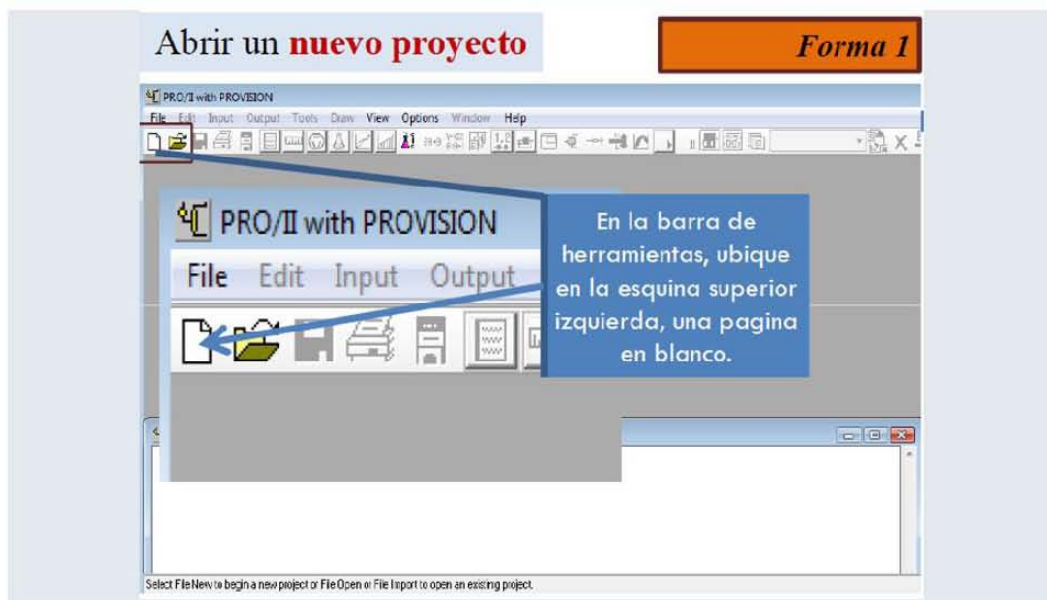
DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.



DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

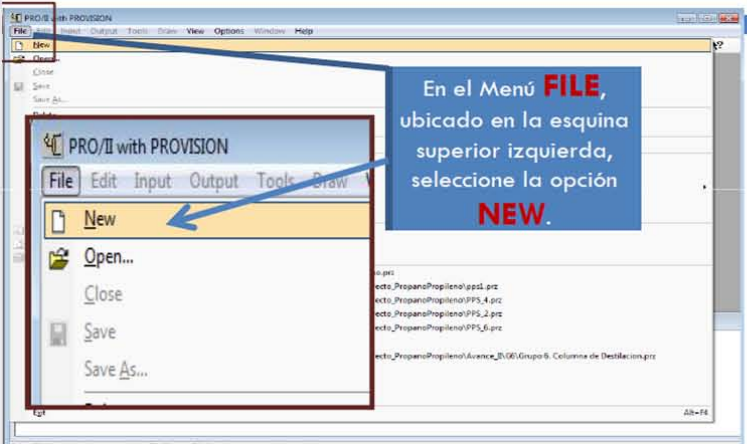


DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.



DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

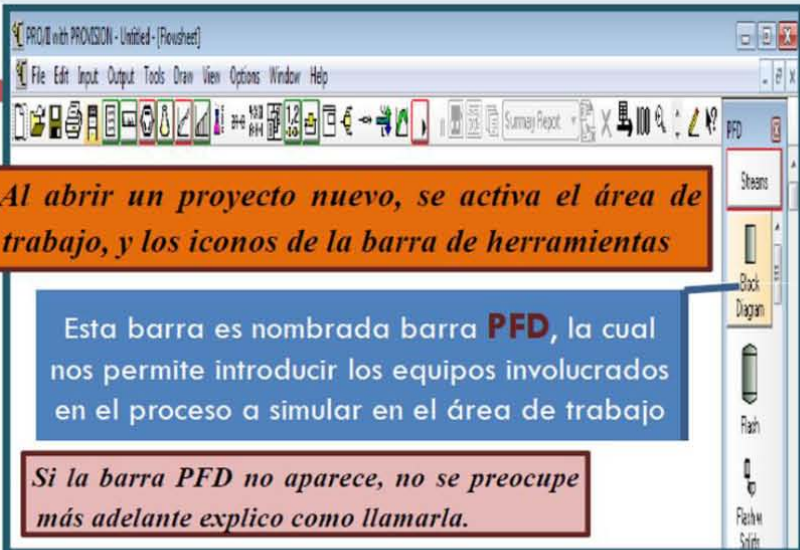
Abrir un **nuevo proyecto** **Forma 2**



En el Menú **FILE**, ubicado en la esquina superior izquierda, seleccione la opción **NEW**.

Select File New to begin a new project or File Open to open an existing project.

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

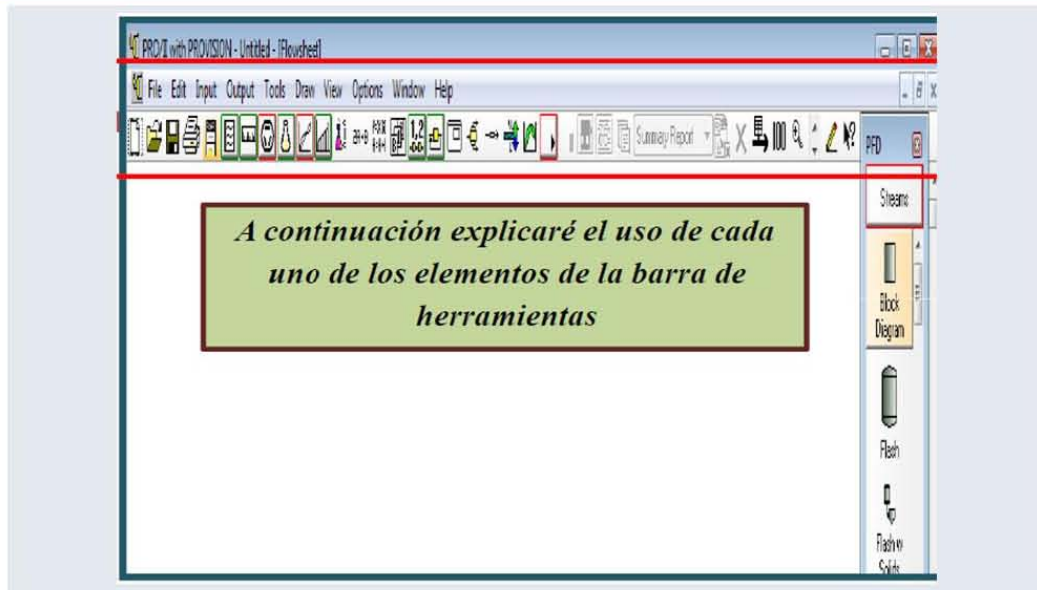


Al abrir un proyecto nuevo, se activa el área de trabajo, y los iconos de la barra de herramientas

Esta barra es nombrada barra **PFD**, la cual nos permite introducir los equipos involucrados en el proceso a simular en el área de trabajo

Si la barra PFD no aparece, no se preocupe más adelante explico como llamarla.

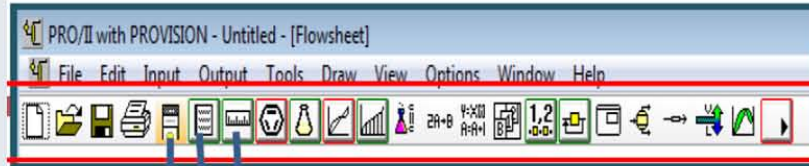
DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.



DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.



DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

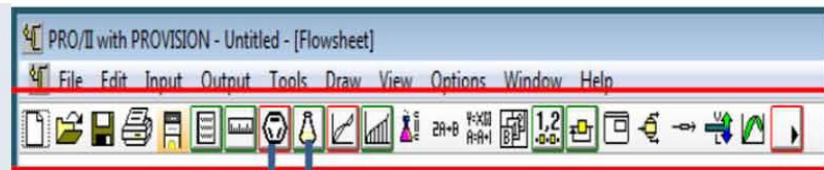


Botón **PFD** del menú **View**, utilizado para **abrir u ocultar** la barra PFD

Botón **Units of Measure** del menú **Input**, utilizado para **establecer** el sistema de unidades, y/o las unidades de medida a utilizar para cada variable, en la simulación en la que se esta trabajando

Botón **Problem Description** del menú **Input**, utilizado para **presentar** una descripción de la simulación en la que se esta trabajando

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

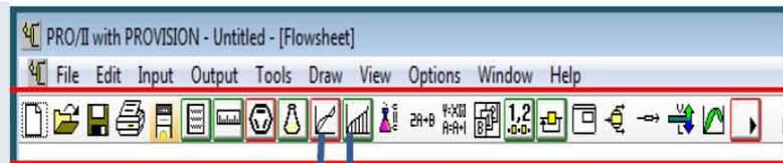


Botón **Component Selection** del menú **Input**, utilizado para **identificar** los componentes manejados en el proceso simulado.

Botón **Component Properties** del menú **Input**, utilizado para **establecer** el calculo de alguna propiedad especial bajo ciertos modelos que ofrece PRO/II.

*Los botones **Problem Description**, **Units Measure**, y **Component Properties** aparecen resaltados en color Verde, por lo que el Simulador toma la información por **default**.*

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

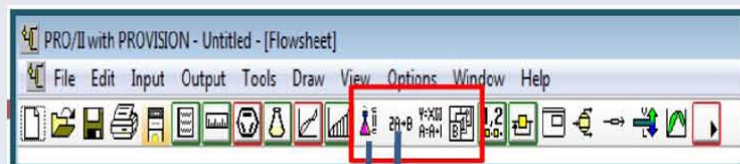


Botón **Thermodynamic Data** del menú **Input**, utilizado para **identificar** el modelo termodinámico empleado para el cálculo de las propiedades.

Botón **Assay Cutpoints and Characterization** del menú **Input**, utilizado para **establecer** las características del Assay, cuando se trabaja con Crudos y/o sus derivados.

*Los botones **Component Selection**, y **Thermodynamic Data** aparecen resaltados en color **Rojo**, por lo que se debe **proporcionar** la información al Simulador.*

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

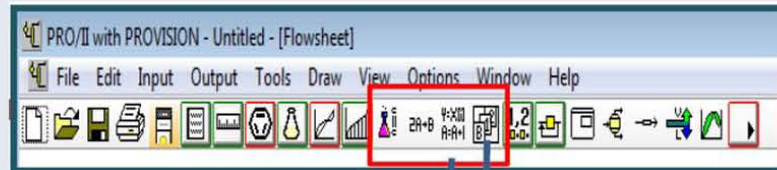


Botón **Thermo Data Manager**, utilizado para **cálculos** de propiedades por modelos específicos, y de menor aplicación.

Botón **Reation Data** del menú **Input**, utilizado para **introducir** los datos cinéticos del reactor, en caso que el proceso estudiado incluya este tipo de equipo.

Estos botones no están resaltados, ya que el tipo de proceso manejado no requiere de este tipo de información.

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.



Botón **Reaction Procedure**, utilizado para **definir** la secuencia de reacción del reactor.

Botón **Case Study Data** del menú **Input**, es una herramienta específica del simulador.

Los botones descritos son los mas comúnmente utilizados en la simulación de procesos.

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

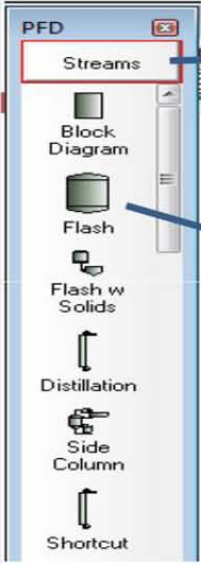


A continuación explicaré los elementos de la barra PFD

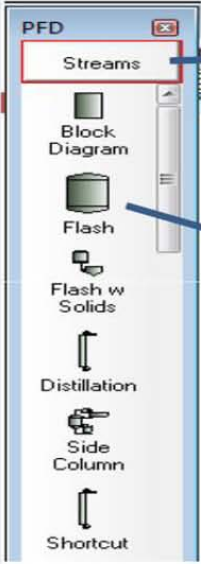
Esta barra contiene los **símbolos** que representan los diferentes **equipos** y **procesos** que permite estudiar el simulador.

Esta barra nos brinda información importante sobre los alcances y limitaciones del programa.

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

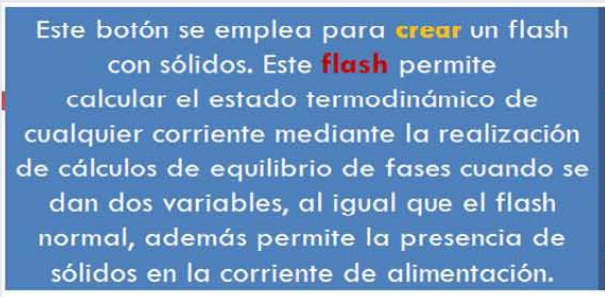


Este botón permite **crear** las corrientes de proceso. Las **corrientes** son todos los flujos identificados en el balance de materia y energía del proceso.

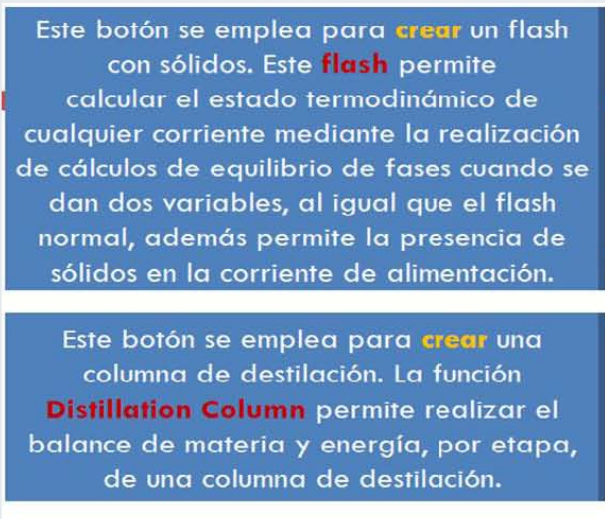


Este botón se emplea para **crear** un flash. Este **flash** permite calcular el estado termodinámico de cualquier corriente mediante la realización de cálculos de equilibrio de fases cuando se dan dos variables.

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

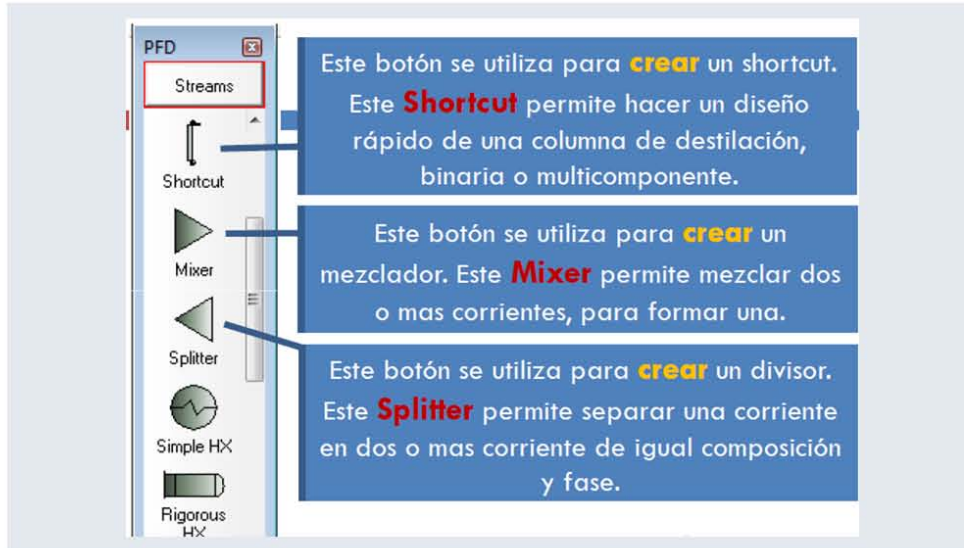


Este botón se emplea para **crear** un flash con sólidos. Este **flash** permite calcular el estado termodinámico de cualquier corriente mediante la realización de cálculos de equilibrio de fases cuando se dan dos variables, al igual que el flash normal, además permite la presencia de sólidos en la corriente de alimentación.



Este botón se emplea para **crear** una columna de destilación. La función **Distillation Column** permite realizar el balance de materia y energía, por etapa, de una columna de destilación.

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

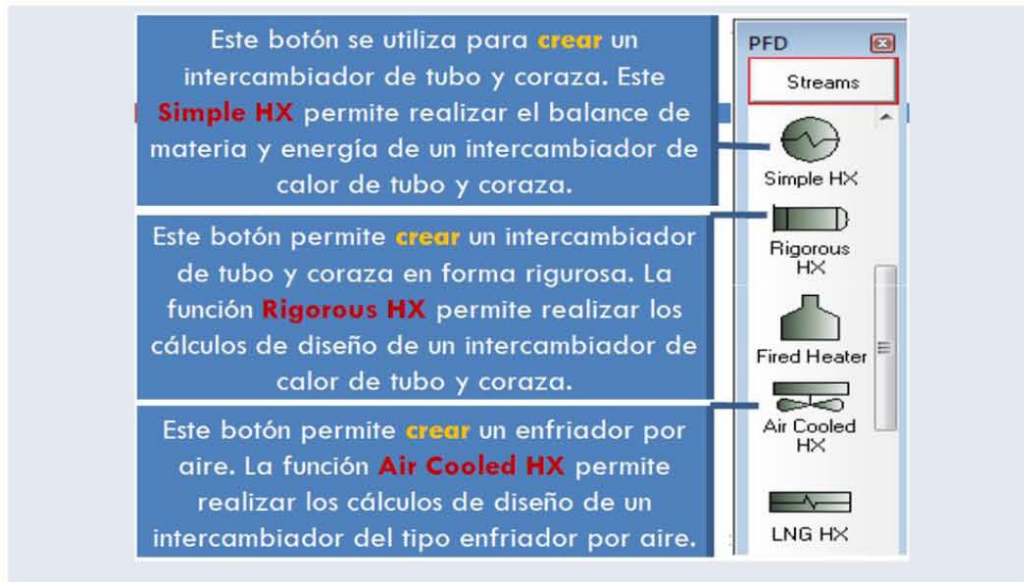


Este botón se utiliza para **crear** un shortcut. Este **Shortcut** permite hacer un diseño rápido de una columna de destilación, binaria o multicomponente.

Este botón se utiliza para **crear** un mezclador. Este **Mixer** permite mezclar dos o más corrientes, para formar una.

Este botón se utiliza para **crear** un divisor. Este **Splitter** permite separar una corriente en dos o más corrientes de igual composición y fase.

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.

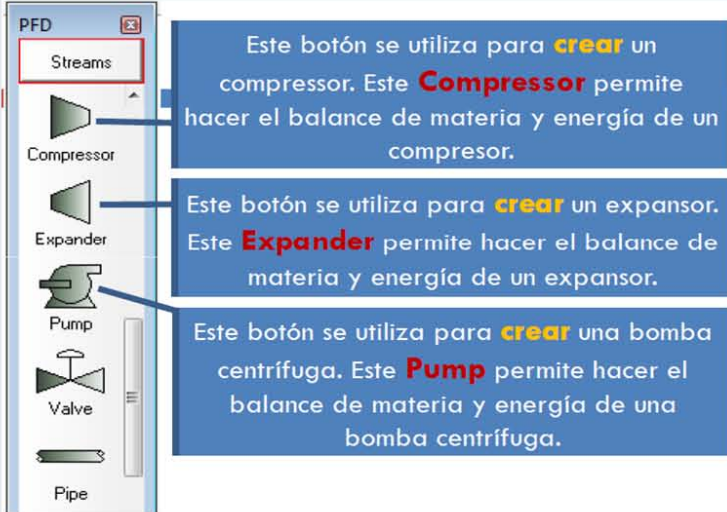


Este botón se utiliza para **crear** un intercambiador de tubo y coraza. Este **Simple HX** permite realizar el balance de materia y energía de un intercambiador de calor de tubo y coraza.

Este botón permite **crear** un intercambiador de tubo y coraza en forma rigurosa. La función **Rigorous HX** permite realizar los cálculos de diseño de un intercambiador de calor de tubo y coraza.

Este botón permite **crear** un enfriador por aire. La función **Air Cooled HX** permite realizar los cálculos de diseño de un intercambiador del tipo enfriador por aire.

DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL SIMULADOR.



Este botón se utiliza para **crear** un compresor. Este **Compressor** permite hacer el balance de materia y energía de un compresor.

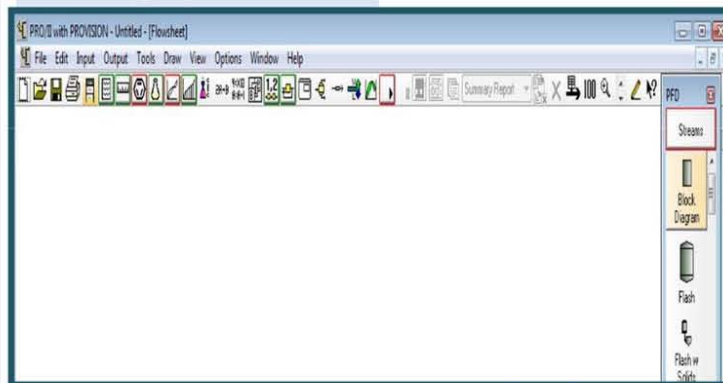
Este botón se utiliza para **crear** un expansor. Este **Expander** permite hacer el balance de materia y energía de un expansor.

Este botón se utiliza para **crear** una bomba centrífuga. Este **Pump** permite hacer el balance de materia y energía de una bomba centrífuga.

PROCEDIMIENTO PARA DESARROLLAR LA SIMULACIÓN

SIMULACION DEL CICLO RANKINE

Abra un proyecto nuevo



A.2 Turbina de vapor.

Las turbinas de vapor se dividen en dos categorías principales: aquellas que se utilizan en la generación eléctrica y aquellas unidades de propósito general que se utilizan en el accionamiento de bombas, compresores, etc., frecuentemente denominadas como turbinas de propulsión mecánica.

La presión del vapor de entrada está normalmente en el rango entre 1,723 kPa (250 psig) con sobrecalentamiento nulo, y 5,860 kPa (850 psig) a 482 °C (900 °F). Algunas turbinas se construyen para operar a 35 kPa (5 psig) con sobrecalentamiento nulo desde una extracción del proceso. Presiones de 10,342, 12,410 y de 16,547 kPa (1,500, 1,800 y 2,400 psig) son comunes para las grandes turbinas de generación, operando algunas a presiones supercríticas entre 24,131 kPa (3,500 psig) a 34,474 kPa (5,000 psig). Las plantas nucleares de generación de vapor producen vapor saturado en el rango de 1,379 a 6,895 kPa (200 a 1,000 psig). Las primeras unidades eran de unos 125 MW; actualmente los tamaños más corrientes están entre los 250 y los 1,500 MW. Estas unidades tienen carcasas múltiples y longitudes de alabe de 1.32 m (52 in) en las etapas de escape a velocidades de 1,800 rpm.

A continuación se presentan algunas imágenes de turbinas de vapor comerciales.

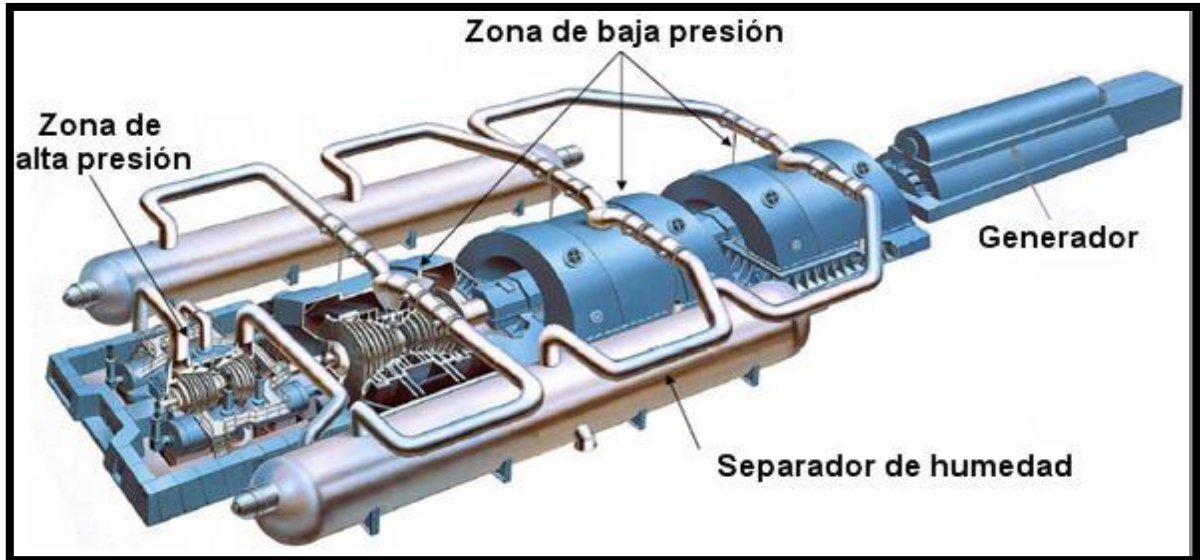


FIGURA A 1 Detalle de Turbina de vapor. Adaptado de: Mitsubishi Heavy Industries
 <<http://www.mhi.co.jp/en/index.html>>.



FIGURA A 2 Turbinas de vapor para ciclos supercríticos. Adaptado del portal de Siemens
 <<http://www.siemens.com/entry/cc/en/>>..
 Salidas desde 90 MW a más de 1,900 MW
 Eficiencias de planta de vapor de más del 46 %



FIGURA A 3 Serie SST-600 Sub/Supercríticas

Salida de 300 a 1,200 MW

Temperatura de vapor principal: arriba de los 600 °C

Presión de vapor principal: arriba de los 300 bar (30 MPa)

Vapor de recalentamiento: arriba de los 620 °C

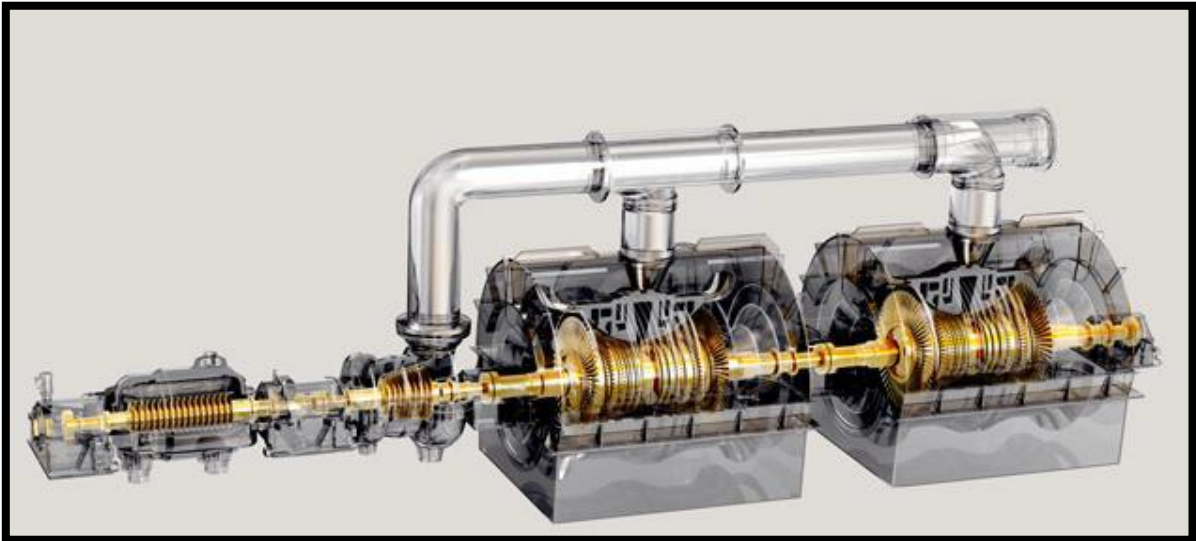


FIGURA A 4 Turbinas de vapor de la serie G. Adaptado del portal de GE Energy
<http://www.gepower.com/home/index.htm>

Características:

Potencia de 500 a 1,100 MW

Condiciones subcríticas de vapor (17 MPa/ 565 °C)

Condiciones supercríticas de vapor (25 MPa/ 565 °C)

Condiciones ultra-supercríticas de vapor (28.5 MPa/ 565 °C)

A.3 Velocidades admisibles usuales para los sistemas de ductos y tuberías.

Velocidades admisibles usuales para los sistemas de ductos y tuberías.

Servicio/aplicación	Velocidad, ft/min
Ductos de tiro forzado	2500 – 3500
Conductos y cámaras de humo de tiro inducido	2000 – 3000
Chimeneas cortas y altas	2000
Líneas de agua (máx.)	600
Líneas de vapor a alta presión	10000
Líneas de vapor a baja presión	12000 – 15000
Líneas de vapor al vacío	25000
Líneas de aire comprimido	2000
Líneas de vapor refrigerante a alta presión	1000 – 3000
Líneas de vapor refrigerante a baja presión	2000 – 5000
Refrigerante líquido	200
Líneas de salmuera	400
Ductos de ventilación	1200 – 3000
Rejillas de registro	500

TABLA A 1 Tabla de velocidades admisibles usuales para los sistemas de ductos y tuberías. Adaptado de: Branan, Carl R. "Soluciones prácticas para el Ingeniero Químico." Edit. McGraw-Hill. México 2000.

A.4 Valores del coeficiente global de transferencia de calor.

Valores representativos de los coeficientes totales de transferencia de calor en los intercambiadores de calor.

Tipo de Intercambiador de calor	U (W/m ² °C)
Agua hacia agua	850 – 1700
Agua hacia aceite	100 – 350
Agua hacia gasolina o queroseno	300 – 1000
Calentadores de agua de alimentación	1000 – 8500
Vapor de agua hacia combustóleo ligero	200 – 400
Vapor de agua hacia combustóleo pesado	50 – 200
Condensador de vapor de agua	1000 – 6000
Condensador de Freón (agua enfriada)	300 – 1000
Condensador de amoníaco (agua enfriada)	800 – 1400
Condensadores de alcohol (agua enfriada)	250 – 700
Gas hacia gas	10 – 40

TABLA A 2 Valores representativos de los coeficientes totales de transferencia de calor en los intercambiadores de calor. Adaptado de: Cengel, Yunus A. "Transferencia de Calor." Edit. McGraw-Hill. México 2004.

A.5 Memoria de Cálculo para la potencia de 1 GW.

La eficiencia de la primera ley del ciclo supercrítico es:

$$\eta = W_c / Q_{ent}$$

$$\eta = (h_9 - h_{10} + h_{18} - h_{11} + h_{12} - h_{13} - (h_{15} - h_{14})) / (h_9 - h_{15} + h_{18} - h_{10} + h_{12} - h_{11})$$

$$\eta = (490.4 - 885 + 3682 - 2984 + 3703 - 2553.5 - (148 - 121)) / (3490.4 - 148 + 3682 - 2885 + 3703 - 2984) \eta$$

$$= 2425.9 \text{ kJ/kg} / 4858.4 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = 49.93\%$$

El caudal másico de agua requerido para alcanzar 1GW de potencia es:

$$P = m_r W_c$$

$$m_r = P / W_c$$

$$m_r = 1000000 \text{ kW} / 2425.9 \text{ kJ/kg}$$

$$m_r = 412 \text{ kg/s}$$

La reacción químico-física del agua es:



$$1 \text{ kg/s H}_2 + 8 \text{ kg/s O}_2 = 9 \text{ kg/s H}_2\text{O} \quad \Delta H_c = 13333.333 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \text{H}_2\text{O}$$

$$m_2 + m_1 = 169.21 \text{ kg/s H}_2\text{O}$$

$$m_1 = 169.21 * 8/9 = 150.408 \text{ kg/s O}_2$$

$$m_2 = 169.21/9 = 18.8 \text{ kg/s H}_2$$

El balance de masa y energía en el intercambiador 3 es:

$$m_7 h_7 + m_{12} h_{12} - m_{11} h_{11} - m_6 \Delta H_c = 0$$

$$m_7 = m_6$$

$$m_t = m_{11} = m_{12}$$

$$m_6 = m_t (h_{11} - h_{12}) / (h_{12} - \Delta H_c)$$

$$m_6 = 412 \text{ kg/s} (2984 \text{ kJ/kg} - 3703 \text{ kJ/kg}) / (3703 \text{ kJ/kg} - 13333.33 \text{ kJ/kg})$$

$$m_6 = 30.76 \text{ kg/s}$$

Balance de masa y energía en el intercambiador 2:

$$m_{18} h_{18} + m_8 h_8 - m_{10} h_{10} - m_5 \Delta H_c = 0$$

$$m_5 = m_8$$

$$m_t = m_{10} = m_{18}$$

$$m_5 = m_t (h_{18} - h_{10}) / (\Delta H_c - h_{18})$$

$$m_5 = 412(3682 - 2885) / (13333.33 - 3682)$$

$$m_5 = 34.023 \text{ kg/s}$$

Balance de masa y energía en el intercambiador 1:

$$m_9 h_9 + m_{16} h_{16} - m_4 \Delta H_c - m_{15} h_{15} = 0$$

$$m_4 = m_{17}$$

$$m_9 = m_{15}$$

$$m_4 = m_t (h_9 - h_{15}) / (\Delta H_c - h_{15})$$

$$m_4 = 412(3490 - 148) / (13333.33 - 148)$$

$$m_4 = 104.427 \text{ kg/s}$$

Balance en el condensador:

$$Q + m_{14} h_{14} - m_{13} h_{13} = 0$$

$$Q = (412 \text{ kg/s}) (121 \text{ kJ/kg}) + (412 \text{ kg/s}) (2553.5 \text{ kJ/kg})$$

$$Q = 1\,002\,190 \text{ kW}$$

Balance en la planta de electrólisis:

$$m_3 = m_{17}$$

$$m_3 \Delta H_c - m_{17} h_{17} - P_e = 0$$

$$P_e = m_{17} h_{17} - m_3 \Delta H_c$$

$$Pe = m_3 (\Delta H_c - h_{17})$$

$$Pe = 169.21 \text{ kg/s} (13333.33 \text{ kJ/kg} - 647.2 \text{ kJ/kg})$$

$$Pe = 2\,146\,620 \text{ kW}$$

A.6 Poder calorífico de los combustibles.

COMBUSTIBLE	FORMULA	PESO MOLECULAR	PODER CALORIFICO MAYOR (MJ/Kg)	PODER CALORIFICO MENOR (MJ/Kg)
Hidrógeno gas	H ₂	2	143.4	120.9
Metano	CH ₄	16	55.8	50.2
Propano	C ₃ H ₈	44	50.6	46.5
Butano		58	49.5	45.6
Fuel Oil			44.0	41.8
Petroleo			44.0	41.8
Keroseno	CH ₂	14	43.0	39.8
Fuel oil residual (pesado)			44-45	37-42
Orimulsión			43.0	40.0
Diesel			42.0	38.5
Carbono	C	12	28.0	28.0
Gas ciudad			32.0	
Coque			26-35	
Antracita			29.9	
Hulla			26-32	

ANEXO 6 1 Poder calorífico de varios combustibles comunes (MJ/kg).¹²¹

El hidrógeno tiene una temperatura adiabática de llama experimental de 2318 °C

Gas	Fórmula	Teórica ⁽²⁾ (° C)	Calculada ⁽³⁾ (° C)	Experimental. (° C)
Parafinas				
Metano	CH ₄	2012	1918	1885
Etano	C ₂ H ₆	2065	1949	1900
Propano	C ₃ H ₈	2356	1967	1930
n-Butano	C ₄ H ₁₀	2084	1973	1905
Olefinas				
Etileno	C ₂ H ₄	1576	2072	1980
Propileno	C ₃ H ₆	2299	2050	1940
Butileno	C ₄ H ₈	3036	2033	1935

ANEXO 6 2 Temperaturas máximas de llama.¹²¹

BIBLIOGRAFÍA.

Libros y artículos.

1. Gregorio Gil García, (2008). “Energías del siglo XXI, de las energías fósiles a las alternativas”. Ediciones Mundi-Prensa.
2. José M. Fernández Salgado. Editorial Mundi-Prensa, (2009). “Tecnología de las energías renovables”. Editorial Mundi-Prensa.
3. Hoffmann, Peter. E. U. 200. “Energy: hydrogen, fuel cells and the prospects for a cleaner planet”. Peter. “Tomorrow’s, MIT Press.”
4. Antonio Madrid, (2009). “Energías renovables (fundamentos, tecnologías y aplicaciones)”. Editorial Mundi-Prensa.
5. Kenneth Wakr, Donald E. Richards (2001). “Termodinámica”. 6ª Edición, Mc Graw Hill.
6. YunusÇengel, Michael A. Boles, (2012). “Termodinámica”. Mc Graw Hill, 7ª Edición.
7. YunusÇengel, Michael A. Boles, (2003). “Thermodynamics”. Mc Graw Hill, 4th Edition.
8. Perry R.H. (1953), “Chemical engineers Handbook”, 7th edition.
9. Perry H. Robert, Don W. Green,(2001) “Manual del Ingeniero Químico”, 4ª Edición, España. Mc Graw Hill.
10. Chapman, Alan J. (1984), “Transmisión de calor”, Editorial Bellisco. España.
11. Richard C. Duncan (2007). “La teoría de Olduvai: El declive final es inminente (Traducido para Crisis Energética por Pedro Prieto)”.
12. Richard C. Duncan, PhD (2007). “The Olduvai Theory: Terminal Decline Imminent”. La Teoría de Olduvai: TSCQ.
13. “Situación que guardan los permisos de autoabastecimiento y los contratos de interconexión en el contexto del proyecto eólico de Istmo” (octubre 2002) en 3 er. Coloquio Internacional sobre oportunidades para el desarrollo Eoloeléctrico del Istmo, CRE.
14. “Instituto de Investigaciones Eléctricas” (octubre 2002) 3er. Coloquio

- Internacional sobre oportunidades para el desarrollo Eoloeléctrico del Istmo.
15. Diagrama de una planta hidroeléctrica. Adaptado de: Comisión Federal de Electricidad. "Del fuego a la energía nuclear." México 2010.
 16. "La Secretaría de Protección Civil" (6 de septiembre de 2011) Xalapa, Ver.
 17. "Del fuego a la energía nuclear." Comisión Federal de Electricidad. CFE. México (2010).
 18. Cátedra Enresa-Iberdrola, (Apuntes) 27 de octubre al 4 de noviembre de 2003, "Ciclo de Energía y Medio Ambiente: Energías Renovables", Madrid, España.
 19. Richard C. Duncan (2007) "The Olduvai Theory: Terminal Decline Imminent".
 20. "EDRO Seeding Socioeconomic Avalanches". «Optimum-Energy Communities» (en inglés). Consultado el 9 de febrero de 2014.
 21. Sordo, A. M. (1988), "Exploración y Explotación. Posibilidades y Limitaciones de la Planeación Energética en México". Colegio de México.
 22. Juan Mata Sandoval, (7 de junio 2002). "Las energías renovables en la política de desarrollo energético sustentable", Subsecretaria de Política Energética y Desarrollo Tecnológico. Guanajuato, México.
 23. International Energy Agency (IEA) Statistics Division (2006), Data Tables, World Resources Institute, Earth Trends.
 24. "Informe petróleos Mexicanos" (2003), PEMEX, Página 4.
 25. "Secretaria De Energía Balance Nacional De Energía" (2002), SENER.
 26. A.M. Sordo (1988), "Exploración y Explotación", Posibilidades y limitaciones de la Planeación energética en México, Colegio México, Página 148 a la 220.
 27. Gupta, Ram B. (2009) "Hydrogen Fuel: Production, transport and storage." CRC Press. E. U.
 28. Praxair México S. de R.L. de C.V. "Hidrógeno".
 29. Calzón, Begoña (mayo, 2003), "El hidrógeno, panacea energética del futuro", en 5Días.com, Madrid España, www.5dias.com.

30. "Electrolysis apparatus for producing hydrogen". Leppaen et al. US Patent 5.665.211. Septiembre de 1997.
31. "Method of electrolysis". Peynecke et al, US Patent 6.033.549. Marzo del 2000.
32. ASSOCIATION FOR THE STUDY OF PEAK OIL AND GAS" (ASPO), 2008.
33. Consejo Superior de Investigaciones Científicas ((11 de marzo 2003) "El gas natural y el hidrógeno en automoción", Madrid.
34. A study of thermodynamic cycle and system configurations of hydrogen combustion turbines. H. Sugisita y H. Mori
35. Antonio González García-Conde, Presidente de la Asociación Española del Hidrógeno, "Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno". Director del Departamento de Aerodinámica y Propulsión, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Páginas 1 a la 16.
36. José Antonio González Ariza (2005). La energía y su transformación, Ed. Mc Graw Hill
37. "Energía Solar disponible para la Ciudad de México". Proceso. Diciembre 2011.
38. Peynecke et al. Marzo del 2000 "Method of electrolysis". US Patent 6.033.549.
39. Leppaen et al. Septiembre de 1997. "Electrolysis apparatus for producing hydrogen". US Patent 5.665.211.
40. Kreuteer W. and Román H. "Electrolysis: The important energy transformer in a world os sustainable energy". International Journal of Hydrogen Energy. 1998, Vol 23, Nro 8, pp 661-666.
41. Goldemberg et al.: Energy for a sustainable world, John Wiley and sons, New Delhi, 1988.

Revistas y tesis.

42. SCIENCE DIRECT "ENERGY", ASSOCIATION FOR THE STUDY OF PEAK OIL AND GAS (ASPO), MARCH 2008. 6TH WORLD ENERGY SYSTEM CONFERENCE

43. Rafael Sánchez Dirzo, Rodolfo Silva-Casarín, Edgar G. Mendoza-Baldwin y Rosa de Guadalupe González-Huerta. "Hidrógeno del Mar". Facultad de Estudios Superiores Zaragoza Campus II UNAM. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, Volumen 15, No 1, 2012. Páginas 49 a 61.
44. "Economic reform, energy, and development: the case of Mexican manufacturing", Aguayo F. y K. P. Gallagher, Energy policy, vol.33, number 7, 2005, pp. 829-837.
45. Gustavo Herrera Olivares (2011) "Tesis: Diseño de un generador de vapor que utiliza hidrógeno como combustible". M en I. Rafael Sánchez Dirzo. Para obtener el título de ingeniero químico UNAM FES Zaragoza. Ingeniería Química.
46. Rafael Sánchez Dirzo (2007) "Central de Generación de 1GW de potencia basada en el ciclo químico- físico del agua". Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM. Revista del IMIQ; 48 (1-2).
47. Ulleberg O. (2003) "Modeling of advanced alkaline electrolyzer: a system simulation approach". International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28, page 21-33.

Páginas de internet.

47. <http://Cogeneramexico.or.mx> (Consultado 9 Octubre 2013)
48. <http://www.sarec-fiq.edu.ni/pmciq/che570/pdf/1j.pdf> (Consultado 13 octubre 2013)
49. <http://www.tecnun.es/asignaturas/termo/Temas/Tema06-P2.pdf> (Consultado 9 octubre 2013)
50. <http://www.cfe.gob.mx> (Consultado 13 octubre 2013)
51. <http://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2009/02/tema-1-ciclo-de-vapor.pdf> (Consultado 22 octubre 2013)

52. http://www.ecured.cu/index.php/Ciclo_de_Rankine (Consultado 10 de febrero 2013)
53. <http://nestorch.freesevers.com/quees.html> (Consultado 29 octubre 2013)
54. <http://www.misrespuestas.com/que-es-una-turbina.html> (Consultado 4 noviembre 2013)
55. <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/TURBINA.htm> (Consultado 7 de noviembre 2013)
56. http://www.google.com.mx/#hl=es-419&scient=psy-ab&q=turbinas&oq=turbinas&gs_l=serp.3..0l4.5622.6801.0.7429.8.8.0.0.0.390.2184.2-7j1.8.0...0.0...1c.1.4.psy-ab.ro1CfrFCnqE&pbx=1&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.r_qf.&fp=7274fe7a173c7a13&biw=1619&bih=686 (Consultado 11 noviembre 2013)
57. <http://www.planetaelectronico.com/cursillo/tema2/tema2.3.html> (Consultado 17 diciembre 2013)
58. <http://www.slideshare.net/robertmora/todo-sobre-condensadores-6816112> (Consultado 19 diciembre 2013)
59. http://www.google.com.mx/#hl=es-419&scient=psy-ab&q=condensadores&oq=condensadores&gs_l=serp.3...214728.221839.0.222382.21.16.0.0.0.0.0.0.0.0...0.0...1c.1.4.psyb.xvAH8vuCAYA&pbx=1&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.r_qf.&fp=7274fe7a173c7a13&biw=1619&bih=686 (Consulta 3 enero 2014)
60. <http://www.powermaster.com.mx/informacion/deareadores.html> (Consultado 6 enero 2014)
61. <http://www.cuevadelcivil.com/2011/04/tuberias-clasificacion-segun-sus.html> (Consultado 30 enero 2014)
62. <http://www.sistemascalefaccion.com/calderas/funcionamiento.html> (Consultado 10 de marzo 2014)

63. http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_690_6_evaluacion_econo/_rid/3113/_mto/3/_wst/maximized?url2print=%2Fwb%2FCONAE%2FCONA_690_6_evaluacion_econo&imp_act=imp_step3&page=0 (Consulta 6 de marzo 2014)
64. <http://spanish.alibaba.com/product-gs/single-extraction-turbine-25mw-steam-turbine-513648966.html> (Consulta 6 marzo 2014)
65. <http://www.clarke-energy.com/gas-engines/trigeneration/> (Consulta 27 febrero 2014)
66. <http://www.genelek.com/Palacios.pdf> (Consulta 11 febrero 2014)
67. <http://es.scribd.com/doc/29933616/Hoja-de-Seguridad-Del-Hidrogeno> (Consultado 18 de marzo 2014)
68. <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno07/Pagina%20Web/energia.htm> (Consultado 11 de marzo 2014)
69. <http://blog.uchceu.es/ingenieria-energia/la-primera-central-de-hidrogeno-estara-en-almeria/> (Consulta 27 marzo 2014)
70. <http://spanish.alibaba.com/p-detail/almacenamiento-de-hidr%C3%B3geno-puede-300000138617.html> (Consulta 24 de marzo 2014)
71. http://www.todoebook.com/TERMOQUIMICA_-I-ELISA-CARRION-CARRION-U_-VALENCIA-LibroEbook-ES-SPB0184303.html (Consultado 7 abril 2014)