



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA EN ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

“DISEÑO Y ANÁLISIS DE PROPUESTAS DE AHORRO DE ENERGÍA EN UN PROCESO INDUSTRIAL DE FUNDICIÓN”

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MARA CINDY CAMPOS GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL
M. EN I. AUGUSTO SÁNCHEZ CIFUENTES
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. AGOSTO 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Aída Gutiérrez Alejandre
Secretario: M. en I. Augusto Sánchez Cifuentes
Vocal: Dr. Gabriel León de los Santos
1^{er}. Suplente: Dra. Azucena M. Escobedo Izquierdo
2^do. Suplente: Dr. Arturo Guillermo Reinking Cejudo

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: **Ciudad Universitaria, México D.F.**

TUTOR DE TESIS:

M. en I. Augusto Sánchez Cifuentes

FIRMA

A Dios y a mi familia. . .

Agradecimientos

A mi esposo Omar Sánchez por su infinita paciencia, por hacerme feliz todos los días y por soportar mi mal carácter siempre con una sonrisa. Esto también te lo debo a ti ¡Gracias!

A mis padres por su enorme cariño, apoyo y esfuerzo diario por hacer que salgamos adelante ¡Gracias, lo logramos!

A mi hermano Julián por su gran sabiduría que siempre me ha aportado excelentes enseñanzas.

A mis amigas Lucero y Diana que me hicieron la maestría mucho más amena, su compañerismo y amistad no tiene límites, gracias por todo.

A mis amigos y compañeros de la maestría que han aportado a mi vida experiencias grandiosas, gracias por su cariño y amistad.

A la máxima casa de estudios UNAM por darme la oportunidad de pertenecer al orgullo azul y oro.

A las Facultades de Ingeniería y Química que me formaron como profesionista.

Gracias al apoyo de CONACyT que mediante el programa de becas para el estudio de Posgrado me proporcionó la solvencia para realizar este trabajo.

Agradezco a los profesores Augusto Sánchez y Gabriel León que me guiaron en el desarrollo de este trabajo y por enseñarme sus experiencias para abrirme camino.



Índice

	Pág.
Resumen.	1
Introducción.	2

Capítulo I Marco teórico

1.1 La industria de fundición	12
1.2 Algunas técnicas de fundición actuales y emergentes.	13
1.3 Hornos de inducción magnética.	15
1.4 Emisiones a la atmósfera.	17

Capítulo II Antecedentes

2.1 Antecedentes.	21
---------------------------	----

Capítulo III Descripción del proceso

3.1 El proceso de Investment Casting o Cera Perdida	27
3.2 Descripción detallada del área de fundición	31
3.3 Usos energéticos en cada área del proceso	35

Capítulo IV Resultados y discusión

4.1 Oportunidades de reducción de energía	39
4.2 Utilización de cogeneración	46
4.3 Diseño de la planta de cogeneración	48
4.4 Análisis del exceso de aire	53
4.5 Diseño de las configuraciones	59





4.6 Resumen y comparación de los resultados de las simulaciones.	67
4.7 Análisis de resultados basado en la Primera Ley de la Termodinámica	68
4.8 Análisis exergético	69
4.9 Análisis exergoeconómico	73
4.10 Análisis costo-beneficio	78

Capítulo V
Conclusiones

5.1 Conclusiones	82
REFERENCIAS	84
ANEXOS	87





RESUMEN

Desde que los costos de los combustibles han incrementado radicalmente durante los últimos años, la industria se ha visto en la necesidad de mejorar sus métodos de obtención de energía, además de que las regulaciones ambientales se han vuelto cada vez más difíciles de satisfacer.

La industria de fundición es uno de los procesos que requieren mayores cantidades de energía actualmente en nuestro país tanto eléctrica como térmica para cumplir con sus operaciones, es por ello que este tipo de procesos representan una excelente oportunidad para generar energía eléctrica a partir de sus efluentes de energía térmica o química desperdiciados.

El proceso de cera perdida es un proceso muy especializado en el que se puede trabajar con varios tipos de aleaciones y se utiliza para producir componentes automotores, aeroespaciales, armamento y joyería.

Este estudio fue realizado en una planta de fundición que opera mediante el proceso de cera perdida y están preocupados por sus muy bajas eficiencias energéticas.

Fueron diseñadas diversas configuraciones de una planta de cogeneración que produce la totalidad de los requerimientos de esta planta tanto eléctricos como térmicos considerando sus efluentes de desperdicio de más de 400°C. Se consideraron ciclos tanto tipo Rankine convencional como ciclos combinados.

Los resultados arrojaron que es posible eliminar la caldera que actualmente se utiliza en la planta y se logran satisfacer por completo las necesidades eléctricas de la planta incluso con la configuración más sencilla. El análisis costo-beneficio mostró periodos de tiempo de recuperación muy rentables de menos de 3.5 años.

Otras propuestas más sencillas fueron desarrolladas en el área de fundición que pueden ser inmediatamente aplicables sin la necesidad de una fuerte inversión, sin embargo los beneficios de éstas pueden ayudar a incrementar la producción y la calidad de las piezas fundidas.





INTRODUCCIÓN

La industria de producción de acero es una de las más demandantes de energía de los sectores de manufactura de nuestro país, y a pesar de que dichos requerimientos han sido producto de la preocupación de los ingenieros metalúrgicos, actualmente se sigue operando con procesos de eficiencia energética muy bajos.

Tan sólo el proceso de fundición de metal (calentamiento del material hasta convertirlo en líquido para vaciarlo) resulta complejo pero además incluye una serie de pasos que incurrir en pérdidas tanto de materia como de energía que son atribuibles a diversos factores como: conducción indeseada, radiación, convección, pérdida de gases de chimenea y/o pérdidas de metal.

Tecnologías recientes como la solar, microondas, infrarrojo o plasma ofrecen medios poco convencionales de proveer grandes cantidades de energía al metal; sin embargo, se pueden presentar limitaciones como falta de capital de inversión o requerimientos de espacio excesivamente altos que hacen estos métodos innovadores financieramente inviables para la industria de fundición.

Los avances alcanzables para los procesos de fundición que han demostrado tener muy alto potencial para la reducción de consumo de energía, se centran en la implementación de mejores prácticas en el proceso de fundición y de novedosas técnicas de ahorro que permiten la utilización de la energía desperdiciada en otros puntos del proceso.

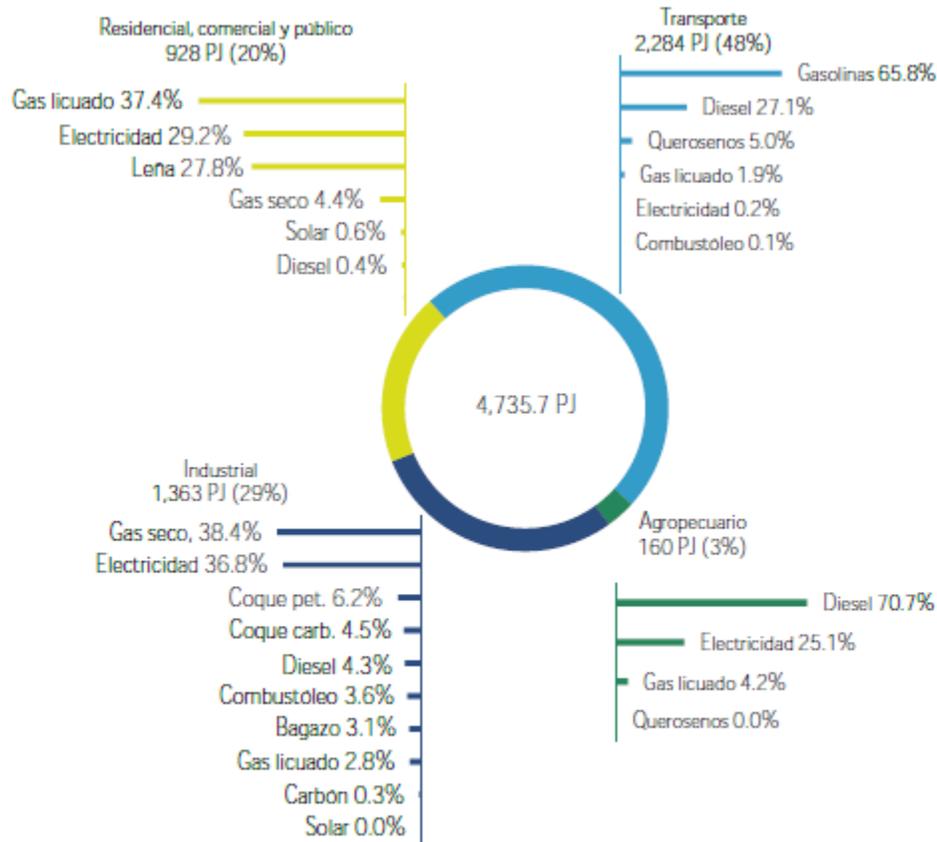
La operación de fundido de metal consiste en diferentes etapas y en cada una existen oportunidades de mejora en el uso de energía por lo que es lógico concluir que la forma de alcanzar la máxima reducción de energía posible en un proceso de fundición dado recae en la implementación de actualizaciones de eficiencia energética apropiadas para cada tipo de proceso.

El proceso de fundición en el sector manufacturero

De acuerdo con datos proporcionados por el Balance Nacional de Energía del 2011 [1], el consumo final energético creció 2.7% en 2011 con respecto a 2010. El consumo del sector industrial mostró el mayor incremento, con un aumento de 65.34 PJ; es



decir, 5% respecto al año anterior. La Figura 1 presenta el consumo final por sectores en el 2011.



Fuente: Sistema de Información Energética, con cálculos propios.

Figura 1. Consumo final energético por sector y energético, 2011.

El sector industrial es el segundo mayor consumidor de energía del país ya que durante 2011 absorbió 28.8% del consumo energético total. Tal consumo mostró un crecimiento de 5% respecto al año anterior, para ubicarse en 1,363.42 PJ.

Las industrias que se identifican como las mayores consumidoras de energía, de acuerdo al Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte son:

- Industria básica del hierro y el acero.
- Fabricación de cemento y productos a base de cemento en plantas integradas.
- PEMEX petroquímica.
- Industria química.
- Fabricación de vidrio y productos de vidrio.

- Fabricación de pulpa, papel y cartón.
- Minería de minerales metálicos y no metálicos, excepto petróleo y gas.
- Elaboración de azúcares.
- Elaboración de cerveza.
- Elaboración de refrescos, hielo y otras bebidas no alcohólicas, y purificación y embotellado de agua.
- Construcción.
- Fabricación de automóviles y camiones.
- Fabricación de productos de hule.
- Elaboración de productos de tabaco.

	2010	2011	Variación porcentual (%) 2011/2010	Estructura porcentual (%) 2011
Total	1,298.08	1,363.42	5.03	100
Energía solar	0.22	0.27	19.83	0.02
Bagazo de caña	37.65	41.67	10.68	3.06
Carbón	5.52	4.29	-22.41	0.31
Coque total	143.41	145.84	1.70	10.70
Coque de carbón	62.83	61.80	-1.63	4.53
Coque de petróleo	80.58	84.04	4.29	6.16
Total de petrolíferos	151.67	145.82	-3.86	10.70
Gas licuado	44.89	38.81	-13.53	2.85
Diesel	50.80	58.04	14.27	4.26
Combustóleo	55.99	48.97	-12.55	3.59
Gas seco	486.97	523.91	7.58	38.43
Electricidad	472.63	501.62	6.13	36.79

Fuente: Sistema de Información Energética, Sener.

Figura 2. Consumo de energía en el sector industrial por energético (Petajoules).

En la Figura 2 se muestran los consumos por energético dentro del sector industrial. El gas seco es el combustible más utilizado ya que aportó el 38.4% (523.91 PJ) del consumo del sector en 2011. Lo anterior implicó un incremento del 7.6% con respecto al año anterior. El consumo de electricidad fue equivalente a 501.62 PJ y representó 36.8% del consumo industrial. El de petrolíferos (combustóleo, diesel y gas licuado de petróleo) que en conjunto contribuyeron con 10.7% de la demanda total, disminuyó 3.9%. Los requerimientos de coque de petróleo en la industria, con una aportación de 6.2%, fueron equivalentes a 84.04 PJ, 4.3% mayor a lo consumido en 2010. Lo anterior

fue resultado del menor consumo en las industrias de fabricación del vidrio, hierro y del acero y fabricación de cemento. El consumo de carbón y coque de carbón representó 4.8% del total y sumó 66.09 PJ, 24.0% menos que en 2010. Ésta disminución resultó principalmente por la caída en el consumo de carbón en la industria básica del hierro y del acero.

	2010	2011	Variación porcentual (%) 2011/2010	Estructura (%) 2011
Total	1,298.08	1,363.42	5.03	100
Otras ramas	636.57	668.41	5.00	49.02
Industria básica del hierro y del acero	151.13	168.97	11.80	12.39
Fabr. de cemento y productos a base de cemento en plantas integradas	123.95	120.47	-2.80	8.84
Pemex Petroquímica	104.26	98.45	-5.57	7.22
Industria química	57.69	66.29	14.90	4.86
Fabricación de vidrio y productos de vidrio	35.95	44.32	23.29	3.25
Fabricación de pulpa, papel y cartón	34.78	36.25	4.24	2.66
Minería de minerales metálicos y no metálicos, excepto petróleo y gas	53.48	53.44	-0.07	3.92
Elaboración de azúcares	42.37	43.11	1.74	3.16
Elaboración de cerveza	14.90	14.47	-2.84	1.06
Elab. de refrescos, hielo y otras bebidas no alcohólicas, y purif. y embotellado de agua	11.00	12.55	14.16	0.92
Construcción	11.97	11.61	-2.96	0.85
Fabricación de automóviles y camiones	10.46	12.69	21.39	0.93
Fabricación de productos de hule	6.73	8.68	28.95	0.64
Fabricación de fertilizantes	2.56	3.37	31.70	0.25
Elaboración de productos de tabaco	0.29	0.33	13.33	0.02

Fuente: Sistema de Información Energética, Sener.

Figura 3. Consumo de energía en el sector industrial (Petajoules).

En la Figura 3 se analizan los consumos energéticos totales por tipo de industria en el año 2011 y su variación con respecto al año anterior. La rama más intensiva en el uso



de energía fue la industria básica del hierro y el acero. Sus requerimientos de energía se totalizaron en 168.97 PJ, que representó el 12.4% del consumo industrial. Respecto a 2010, el consumo incrementó 11.8%, principalmente por un mayor consumo de gas seco. En la Figura 4 se muestran los consumos energéticos de las principales ramas industriales y su estructura por tipo de energético en el año 2011.

La industria básica del hierro y del acero sobresale preponderantemente de los siguientes ramos industriales ya que uno de los energéticos más fuertemente utilizados por dicha industria es el gas natural (gas seco) con una aportación del 46.3%, mientras que el carbón o coque de carbón ocupa el segundo lugar con un 36.6% de aportación.

En la Figura 4 se muestra además un análisis mucho más detallado sobre los consumos energéticos por sector industrial de manufactura, por tipo de energético utilizado y por cantidad de dicho energético consumido.

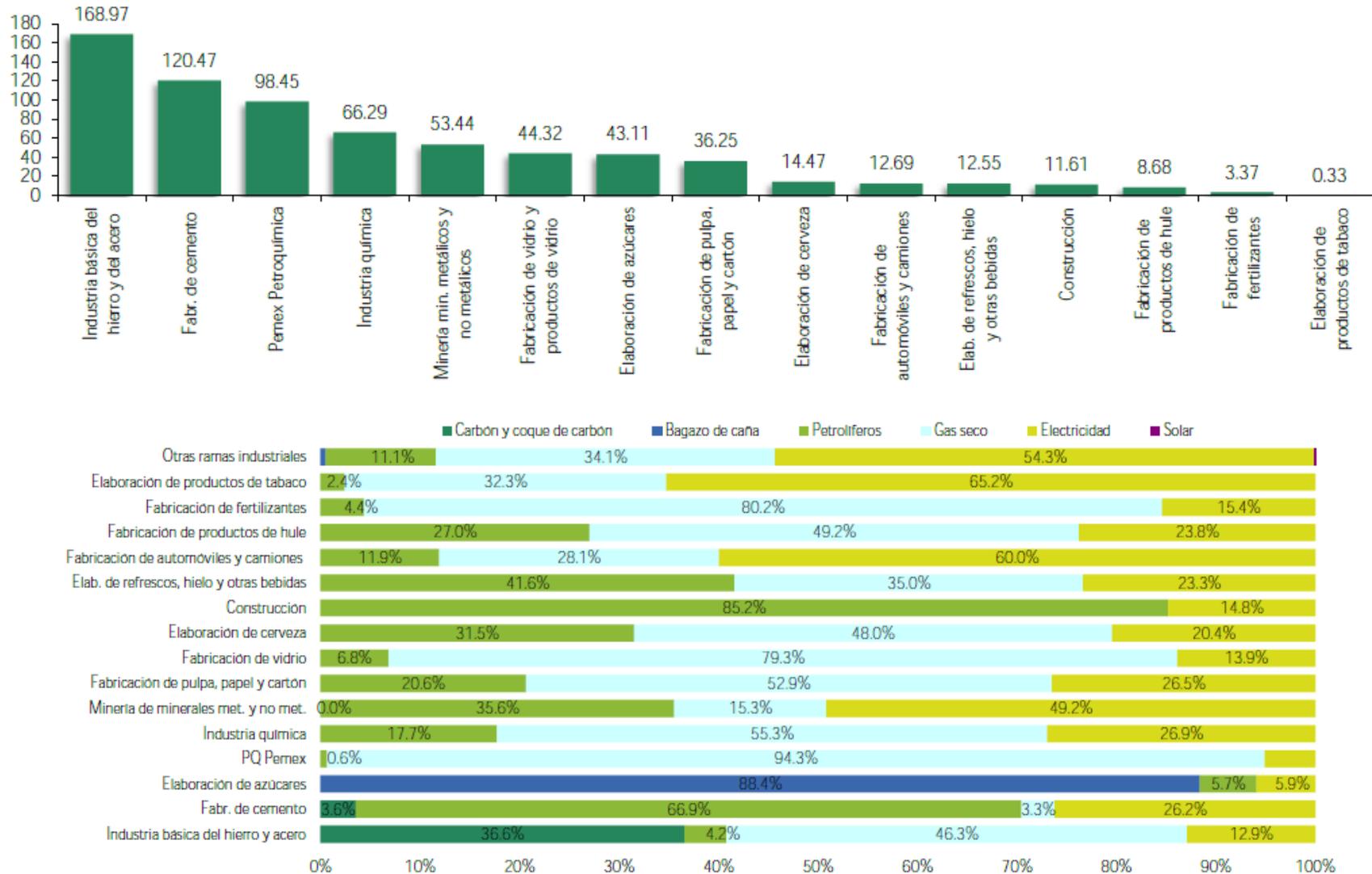


Figura 4. Consumo energético de las principales ramas industriales y estructura por tipo de energético en 2011 (Petajoules).

Necesidades energéticas del proceso de fundición

Los procesos de fundición ya sea de metal, vidrio u otros materiales han sido vitales por varios cientos de años con el objetivo de derretir sólidos que sea posible verter en diferentes moldes de utilidad.

A pesar de que el proceso básico sigue siendo prácticamente el mismo, la utilidad de los productos de la fundición ha recorrido ya un largo camino. Los procesos que crearon diferentes herramientas y bienes en la Era de Bronce contribuyen con componentes utilizados en el 90% de los bienes manufacturados en nuestra sociedad actualmente. Desde el decaimiento de la Era Industrial surgió un enorme desarrollo en los procesos de fundición, incrementó la cantidad de productos, se mejoraron los controles químicos y térmicos y se incrementó la complejidad de los productos terminados lo que derivó en una vasta cantidad de productos como generadores de potencia, sistemas de bombeo, automóviles, trenes, tuberías, equipo militar, instrumentos médicos, etc.

La eficiencia energética de cualquier proceso de fundición generalmente recae en el proceso de vaciado, operación de varios pasos en los que el metal básicamente es calentado, tratado, aleado y transportado a las cavidades de los moldes en los que será vertido. Dicho proceso claramente no es el único responsable del consumo de energía, pero es crítico para el control de calidad, composición y las propiedades físico-químicas del producto final.

De acuerdo con el reporte anual de fundición de acero del 2004 [2], los procesos más significantes en cuanto a consumo de energía son: fabricación de moldes, reforzamiento de moldes, vaciado, post vaciado, tratamiento térmico, entre otros. En la Figura 5 se muestra la distribución de los consumos de energía de acuerdo con las etapas mencionadas anteriormente.

Las fuentes de energía más comunes se muestran en la Figura 6 y claramente se observa una tendencia hacia el uso del gas natural como combustible; sin embargo, esto depende del tipo proceso de fundición que se lleve a cabo.

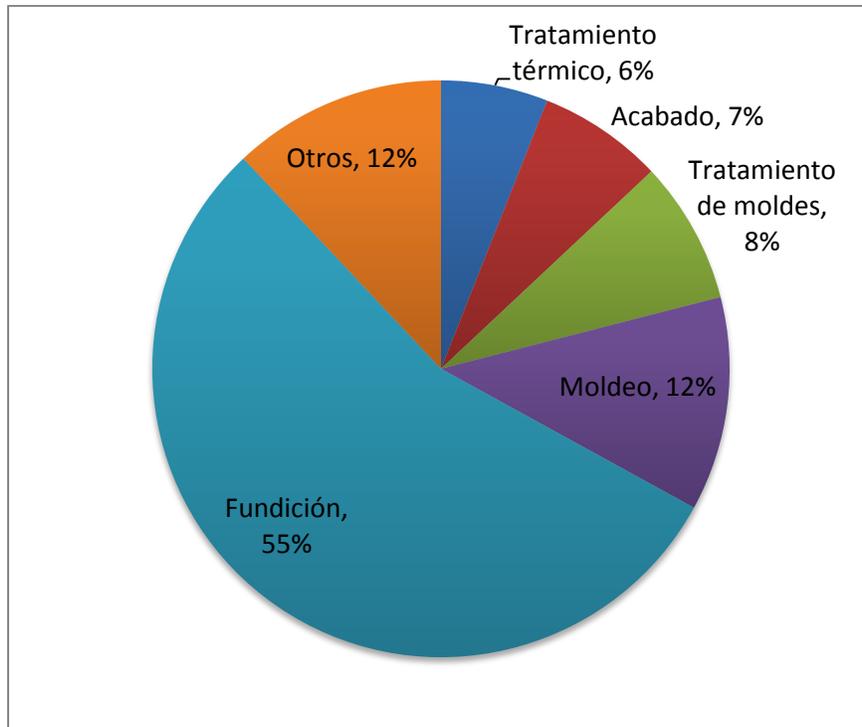


Figura 5. Distribución de la energía en los procesos de fundición de metal. Fuente: 2004 Metal Casting Annual Report [2].

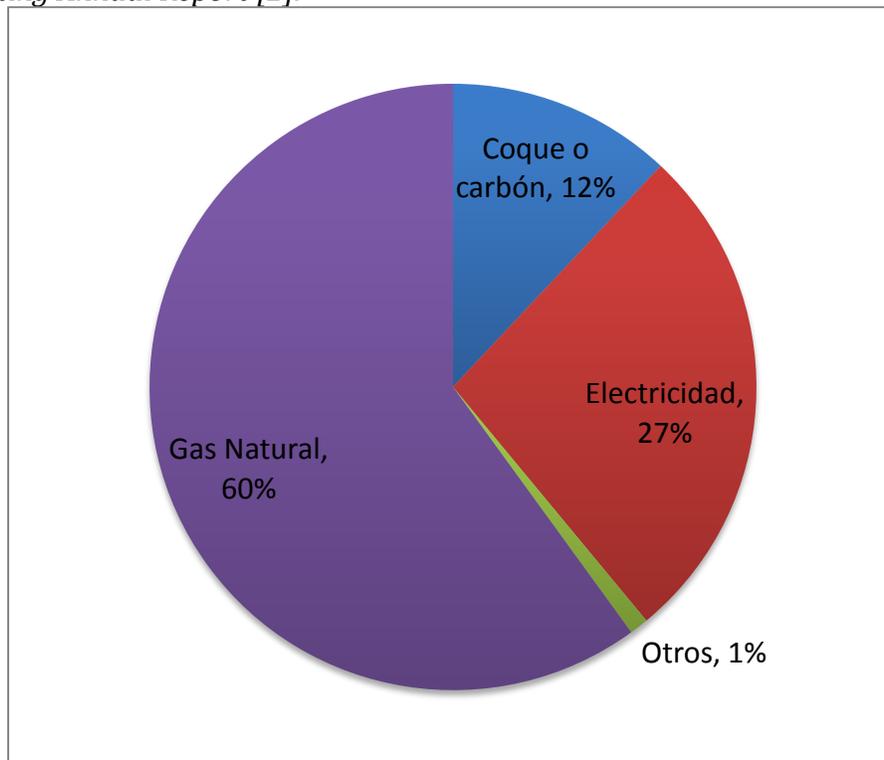


Figura 6. Fuentes de energía comunes en procesos de fundición. Fuente: 2004 Metal Casting Annual Report [2]. *La energía eléctrica representa energía entregada.



Actualmente existe una creciente preocupación en cuanto los consumos energéticos en todos los ramos industriales; sin embargo, resulta evidente imaginar que los procesos más demandantes de energía se vean mayormente afectados por dichos cambios.

En todo el mundo se han presentado casos en los que las ganancias y utilidades de las empresas se ven afectadas por constantes incrementos en los costos de los energéticos y obviamente la industria del hierro y del acero no es la excepción, lo que conlleva a la realización de este estudio.

En México existen pocos estudios realizados a procesos como la fundición en los que se plantean mejoras para el ahorro de energía; sin embargo, numerosos casos de refinerías de petróleo han implementado, incluso desde su diseño, técnicas que incluyen la disminución de emisiones contaminantes a la atmósfera y además el ahorro de energía térmica y eléctrica mediante la implementación de plantas de cogeneración que satisfacen sus necesidades de energía eléctrica incluso en su totalidad.

Es necesario llevar este tipo de propuestas a la industria que en este caso requiere de grandes cantidades de energía no sólo térmica sino eléctrica debido a la naturaleza de su proceso.

Cabe mencionar que este es un proceso como muchos otros en nuestro país, que necesitan personas dedicadas al uso eficiente de la energía para implementar mejoras desde pequeñas que produzcan ahorros apenas monetariamente notables hasta reducciones mucho más significantes no solo económicas sino ambientales.

Los beneficios pueden ayudar a la empresa a incrementar sus utilidades pero además es conveniente para nuestro país implementar procesos cada vez más limpios, económicos y eficientes.

Actualmente existen numerosas plantas industriales que tienen grandes requerimientos de energía; sin embargo, después de utilizar dicha energía la degradan hasta cierto nivel que sigue siendo posible su utilización en otros puntos del proceso.





La industria metalúrgica es uno de los procesos de manufactura que mayores requerimientos de energía tiene, pero además, es un tipo de energía que se puede considerar de “alta calidad” ya que se manejan temperaturas muy elevadas para llevar a cabo el proceso de fundición del metal.

A pesar de que dichos consumos de energía han sido de interés para los ingenieros metalúrgicos, ésta industria continúa operando con niveles de eficiencia energética muy bajos. Es por ello que el propósito de este estudio es explorar y analizar las diferentes oportunidades que existen en la recuperación de energía a lo largo de todo el proceso de fundición, pero además considerando desde la materia prima hasta el producto terminado y centrándose en los efluentes que mayor oportunidad de recuperación pueden ofrecer.

El objetivo del presente proyecto es el análisis de un proceso industrial con altos requerimientos de energía para desarrollar propuestas que permitan el ahorro de energía mediante la recuperación de los desperdicios y el envío de los mismos a otros puntos del proceso en los que se requiera.





Capítulo I

Marco Teórico



La industria de fundición

Las operaciones industriales deben prestar atención a numerosos factores que podrían tener impacto en los objetivos que desean alcanzar en sus procesos de fundición. Algunos de estos factores pueden ser:

- Necesidades de espacio.
- Tipo y variedad de aleaciones que se procesarán.
- Fluctuaciones en la demanda de metal durante la operación.
- Calidad del metal.
- Cantidad de desperdicios.
- Emisiones a la atmósfera.
- Requerimientos de mantenimiento.
- Inversión de capital.
- Cantidad de metal requerido.
- Requerimientos de la(s) aleaciones.
- Costos de operación, en especial de producción.
- Confiabilidad de los equipos.
- Durabilidad de los hornos.

La eficiencia energética no es necesariamente el único factor significativo a la hora de seleccionar un equipo de fundición donde los costos de la energía son muy elevados; sin embargo sí se ha convertido en uno de los factores prioritarios.

El diseño del horno debe reunir algunos requerimientos para proveer un proceso de fundición eficiente. Estos requerimientos incluyen la habilidad de producir metal de alta calidad mediante un control adecuado de la temperatura del baño y minimizar las pérdidas de energía para cumplir con requerimientos ambientales. A pesar de que los costos de los combustibles, metales y operación son variables, la eficiencia energética siempre será una consideración importante, especialmente con la tendencia actual de incremento en los costos de la energía. La mejora en la eficiencia de fundido y el cuidado de algunos aspectos de operación son fundamentales para mantener a la industria de fundición de metal competitiva frente a otros procesos.

Algunas técnicas de fundición actuales y emergentes

Muchos estudios han sido llevados a cabo durante los últimos 15 años para determinar el perfil de energía de la industria de fundición [5]. Actualmente se



utilizan muchos diferentes tipos de moldeo y procesos de fundido en la industria y muy pocas plantas resultan parecidas. Muchas otras plantas incluso poseen otros procesos adicionales a la fundición.

Generalmente, los procesos de fundición pueden ser clasificados por el tipo de horno que utilizan, es por ello que a continuación, se hace una breve clasificación de los tipos de horno que se manejan actualmente en la industria.

1. Hornos de fundición establecidos.

- | | |
|--------------------------------|---------------------------|
| 1.1. Hornos de crisol. | 1.5. Hornos de inducción. |
| 1.2. Hornos cúpula. | 1.6. Hornos de reverbero. |
| 1.3. Hornos de arco eléctrico. | 1.7. Hornos rotatorios. |
| 1.4. Hornos de inmersión. | |

2. Hornos de fundición experimentales.

- 2.1. Fundición con haz de electrones. (Electron Beam Melting EBM).
- 2.2. Calentadores de inmersión. (Immersion heaters. High-Temperature Melting).
- 2.3. Calentamiento infrarrojo.
- 2.4. Fundición con microondas. (Microwave heating).
- 2.5. Calentamiento con plasma. (Plasma Heating).
- 2.6. Hornos solares.

Los hornos de fundición mayormente utilizados en la industria son los de inducción y cúpula (cúpula and induction furnace melting).

En este proyecto se realizará un análisis al proceso de fundición en el que se utilizan hornos de inducción por lo que en los siguientes párrafos se hace una breve descripción de su funcionamiento y operación.



Hornos de inducción magnética

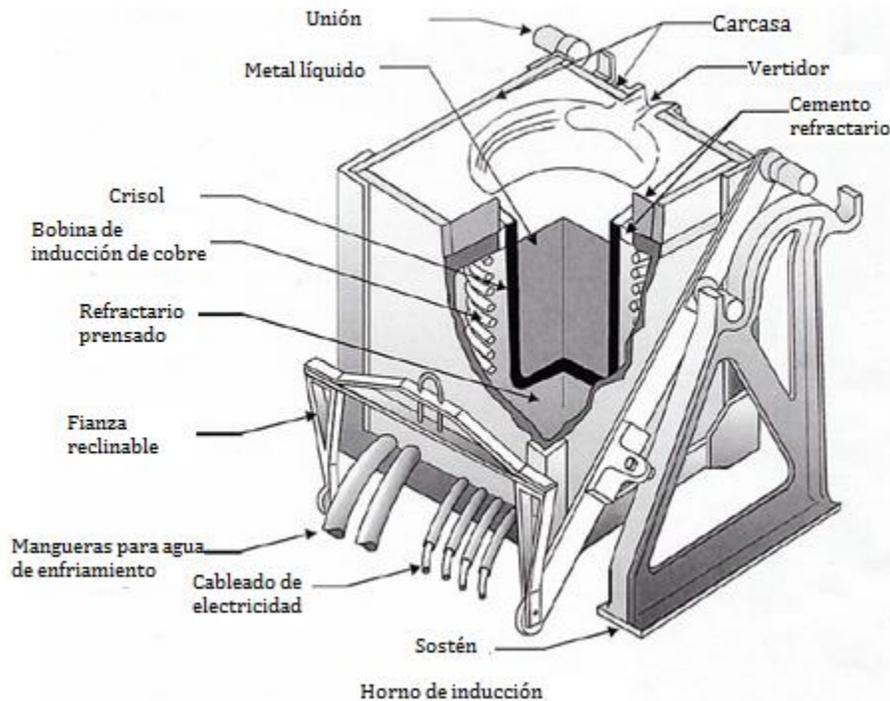


Figura 7. Horno de inducción magnética y sus partes que lo componen [5,10].

Los hornos de inducción magnética (EIF), además de su amplia resistencia, son utilizados como hornos de retención entre la fundición y las líneas de vacío para suavizar variaciones metalúrgicas y controlar la temperatura o sobrecalentar el baño después de la fusión.

En la Figura 7 se muestra el diagrama de un horno de inducción. Está compuesto por un sistema de agua de enfriamiento y una bobina de cobre que rodea una cavidad recubierta por un material refractario. Una corriente inducida es producida en la carga de metal por una corriente alterna en la bobina. Una vez que la carga está fundida, un proceso de mezclado es llevado a cabo como resultado de la interacción de las corrientes entre el caldo y el campo magnético. La velocidad de mezclado incrementa con la potencia.

A lo largo de los años se han creado diversos métodos para suministrar energía al horno más eficientemente y poder hacerlos más pequeños. Por lo que algunos avances en el suministro de energía y diversas mejoras en los controladores del proceso han

permitido que los ingenieros desarrollen sistemas con un infinito número de frecuencias y voltajes durante los años 90.

Estos nuevos diseños permiten la máxima utilización de la energía del horno a través del ciclo de fusión, con un buen control de mezclado.

Hornos pequeños con potencias muy elevadas de 700 a 1,000 kW/TON son capaces de fundir una carga fría en 30 min. Como la carga metálica no está inmersa en el baño de acero, no se requiere el precalentamiento de la carga, aunque algunas veces es utilizado.

Generalmente se llevan cabo dos tipos de procesos de fusión con hornos de inducción. En la Figura 8, se muestra un diagrama de estos dos procesos, uno es conocido como Heel Melter y el segundo como Batch Melter. La diferencia entre ambos es que en uno se debe de mantener cierta cantidad de metal fundido en el fondo y en el segundo se funde la carga completa, se utiliza por completo y al hacer una segunda carga, se vuelve a fundir todo otra vez y así se repite por ciclos y cargas completas.

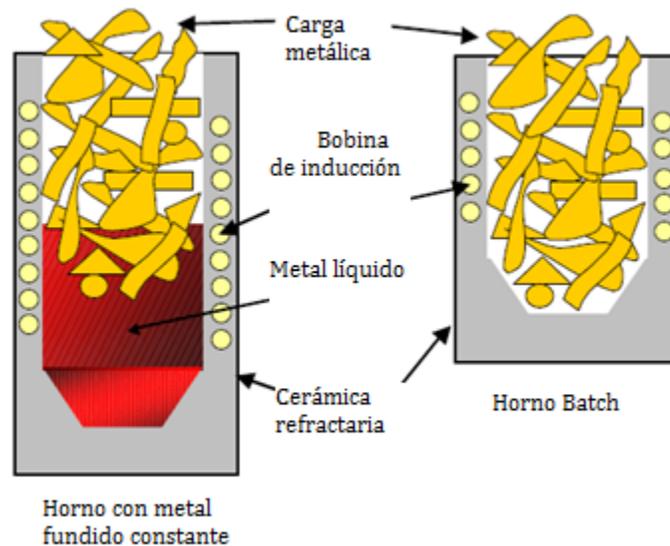


Figura 8. Tipos de hornos de inducción magnética. KERAMIDA, Indianápolis, IN.

En la Figura 9 se muestra el balance de energía de un horno moderno de inducción magnética por cargas (Batch Melter). El diagrama muestra que si $1.24E6$ kJ son enviados al proceso de fundición, $1.22E6$ son utilizados realmente para fundir cada tonelada de metal. La energía necesaria por una planta de generación para proveer al

proceso de fundición $1.91E6$ kJ es de $6.01E6$ kJ. En el diagrama se muestran las pérdidas del proceso hasta obtener el metal fundido.

Esta figura está basada en las mejores prácticas de un proceso de fundición de inducción por cargas que en promedio utiliza 530 kW/TON. Las cantidades mostradas son sólo considerando la energía de fundición de los hornos de inducción por cargas. Este análisis además, no considera las bombas de agua de enfriamiento e intercambiadores de calor. Los datos fueron obtenidos de la literatura presentada por Inductotherm [6,7].

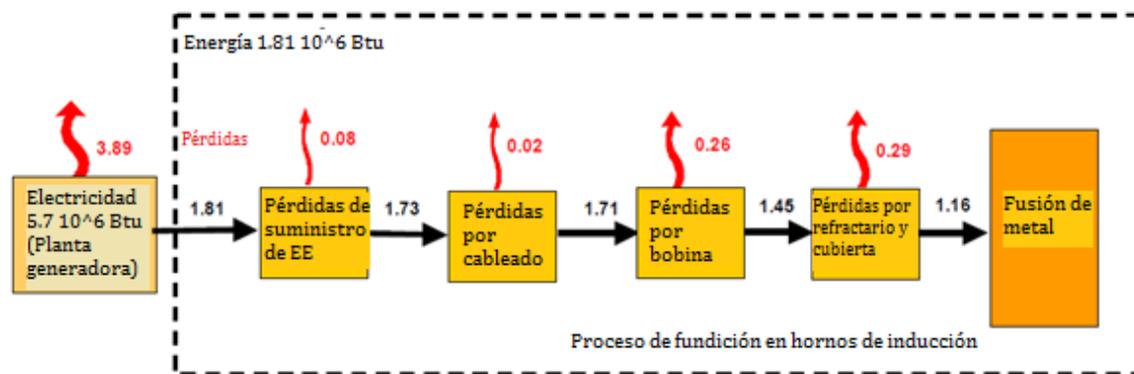


Figura 9. Balance de energía para un proceso de inducción magnética moderno (10^6 kJ/TON fundida)*. Datos de Inductotherm [6,7]

Los documentos revisados para llevar a cabo esta investigación han arrojado algunas recomendaciones en cuanto a eficiencia energética para obtener ahorros considerables. A continuación se mencionan algunos puntos a considerar.

Emisiones a la atmósfera

Las emisiones formadas como resultado del proceso de fundición son un aspecto a considerar para la mejora de tales procesos. Dichas emisiones son principalmente generadas por dos medios durante el proceso de fundición:

- Emisiones relacionadas con el suministro de la energía.
- Emisiones relacionadas con la preparación, refinamiento y tratamiento.

Las primeras se refieren a las emisiones generadas durante la quema de combustibles ya sea para la generación de energía eléctrica o durante el proceso de fundición de

metal y las segundas se refieren a las emisiones generadas para la obtención de la materia prima que se requiere para llevar a cabo el proceso de fundición.

De acuerdo con análisis realizados a otras plantas [11], aproximadamente el 60% de la energía utilizada en el proceso de fundición es suministrada por medio del gas natural u otros combustibles equivalentes y aproximadamente un 30% por electricidad.

Uno de los combustibles más limpios que se pueden utilizar como fuente de energía es el gas natural ya que está compuesto principalmente por metano con una composición de aprox. 90-98%. Los productos de la combustión de este combustible se componen básicamente de CO₂ y vapor de agua. Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxidos de azufre (SO₂) y otras partículas provenientes de la combustión del gas natural son alrededor de uno a tres órdenes de magnitud menor comparadas con la quema de otros combustibles como carbón o diesel.

Tabla 1. Niveles de emisiones provenientes de la quema de combustibles fósiles conocidos.

EMISIONES [kg/billón k] de combustible]	GAS NATURAL	DIESEL	CARBÓN
Dióxido de carbono [CO ₂]	50,349	70,574	89,509
Monóxido de carbono [CO]	17	14	90
Óxidos de nitrógeno	40	193	197
Dióxido de azufre	0.4	483	1,115
Partículas suspendidas	3	41	1,181
Mercurio	0	0.003	0.0069

En la Tabla 1, se muestra una comparación entre 3 diferentes tipos de combustible muy comunes para la obtención de energía. Se puede observar que el más limpio es el gas natural tan sólo con la reducción significativa de emisiones de SO₂ y NO_x, gases que provocan lluvia ácida y son de efecto invernadero.

Por otro lado, los procesos de fundición que utilizan electricidad no producen emisiones in situ; sin embargo, las emisiones producidas para la generación de energía eléctrica y la transmisión de la misma son bastante considerables. De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990- 2006

(INEGEI), el sector energía (producción, transformación, manejo y consumo de productos energéticos) es la principal fuente de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en México. Representó 60.7% del total de las emisiones durante 2006 [1].

Dentro del contexto internacional, la Agencia Internacional de Energía ha identificado que el sector energético contribuye con aproximadamente 80% de las emisiones de GEI en el mundo [12]. En su mayoría (60%), se derivan de la liberación de CO₂ durante la combustión, como resultado de la oxidación de carbono en sus combustibles. No obstante, también existen emisiones fugitivas producidas por la liberación de gases como el metano (CH₄).

En México, del total de las emisiones de GEI en 2011, 86.8% (432.73 Tg CO₂ eq.) correspondió a las emisiones asociadas al consumo de combustibles, y el restante 13.2% (65.78 Tg CO₂ eq.) a emisiones fugitivas.

Tabla 2. Emisiones de GEI por gas, 2011 (Tg de CO₂ eq.)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total CO ₂ eq
Consumo de combustibles	417.09	1.87	13.77	432.73
Consumo propio	37.73	0.03	0.04	37.80
Generación de electricidad	132.77	0.16	0.51	133.44
Industrial	54.19	0.07	0.14	54.39
Transporte	159.33	0.47	12.67	172.47
Comercial	4.68	0.01	0.02	4.71
Residencial	19.67	1.09	0.37	21.14
Agropecuario	8.72	0.03	0.02	8.77
Emisiones fugitivas	0.00	65.78	0.00	65.78
Industria del petróleo	0.00	0.43	0.00	0.43
Industria del gas	0.00	62.71	0.00	62.71
Industria del carbón	0.00	2.64	0.00	2.64
Emisiones CO ₂ equivalente	417.09	67.65	13.77	498.51

Fuente: SENER e INE. Cálculos propios utilizando la metodología del IPCC de 1996.

En la Tabla 2 se pueden observar las emisiones de GEI más importantes correspondientes a la generación de electricidad, las cuales corresponden al 3er lugar en cuanto a generación de CO₂, después del sector transporte y la quema de combustibles.



Es por estos motivos por los que la baja eficiencia de la generación y transmisión de energía eléctrica deben ser considerados como un factor importante en cuanto a la contribución de emisiones de GEI.

Las emisiones atribuibles a la preparación, refinamiento y tratamiento son generadas en varias cantidades dependiendo del grado de procesamiento que debe ser llevado a cabo. Estas emisiones resultan de la suciedad, humedad e impurezas metálicas en la carga de metal; productos de la erosión y corrosión del contacto del metal con el material refractario y la adición de los componentes de la aleación y tratamiento químico utilizado para la remoción de impurezas y gases disueltos. Existen muchos tipos de fundiciones en el mundo y resulta casi imposible encasillar a cada una de ellas en una categoría ya que puede variar desde el primer paso hasta el último.

El proceso que se analizó para llevar a cabo este estudio es un tipo de fundición conocida como Investment Casting o Cera Perdida. En breve se describirán cada una de las etapas que lo componen.





Capítulo II

Antecedentes



La Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables del Programa de Tecnologías Industriales de Estados Unidos (ITP) ha trabajado en conjunto con diferentes compañías para identificar proyectos de ahorro de energía (Plant-wide assessment PWA) que pueden ser utilizados en diferentes industrias para obtener múltiples ahorros [13, 14, 15, 16].

En promedio, los hallazgos de una sola evaluación pueden ser replicados en otras plantas industriales con sistemas y uso de energía equivalentes con una inversión inicial relativamente baja.

Algunas compañías que han participado en ciertas evaluaciones energéticas pueden ahorrar un mínimo de \$1 millón de dólares anuales debido a la reducción del consumo de energía, reducción de desperdicios e incremento de la productividad, todo esto con un tiempo de recuperación menor a 18 meses.

El Programa de Tecnologías Industriales (ITP) de Estados Unidos ha publicado diversos casos de éxito en los que se han obtenido ahorros en los costos de energía. Algunos de estos casos se resumen en la Figura 10 [13]:

Oportunidades de ahorro de energía identificados a través de los proyectos Plant- Wide Energy			
3M	\$1,094,000	Corning	25,920,000
Akzo Nobel	1,170,000	Equilon Enterprises	52,500,000
Alcoa (alumina production)	1,072,000	Ford	3,280,000
Alcoa (aluminum extrusion)	1,974,000	Georgia-Pacific Crossett	9,600,000
AMCAST	3,600,000	Inland Paper	9,500,000
Anchor Glass Container	1,638,000	Metlab	518,000
Appleton Paper	3,459,000	North Star Steel	2,640,000
Bayer	1,478,000	Utica Corporation	1,880,000
Boise Cascade	707,000	Weyerhaeuser Longview	3,100,000
Caraustar	1,280,000	WR Grace	840,000

Figura 10. Oportunidad de ahorros anuales identificados en distintas plantas en las que se llevó a cabo la evaluación por parte de ITP.

La compañía Ford Cleveland Casting Plant (CCP) en Cleveland, Ohio, realizó una evaluación para identificar los componentes del proceso de producción que tuvieron los ahorros potenciales más importantes [13].



El equipo de trabajo de la evaluación que se llevó a cabo identificó 16 proyectos de ahorro de energía a corto plazo que involucraban distintos aspectos como: combustión, aire comprimido, agua, vapor, motores y sistema de iluminación. Estos proyectos representaron un total de \$USD3.3 millones por año en ahorros de energía anuales de casi 18 millones de kilowatts hora (kWh) en electricidad y cerca de 63,106 MMkj en combustible.

Además, dos proyectos a largo plazo fueron identificados que juntos podrían representar otros \$USD 9.4 millones en ahorros de energía y más de 633,000 MMkj en combustible y más de 8 millones de kWh en electricidad.

Los proyectos encontrados, actividades a realizar y potenciales ahorros se muestran en la Figura 11.



Table 1. Summary of Assessment Recommendations (A.R.) from Plant-Wide Energy Assessment at Ford Cleveland Casting Plant						
A.R. No.	Description	Annual Savings			Project Cost	Simple Payback (yr)
		Electricity (kWh)	Natural Gas (MMBtu)	Other Fuel (MMBtu)		
Recommendations for Short-Term Considerations						
1	Reduce excess air in cupola blast air preheaters		64,000		\$361,000	None Immediate
2	Inspect, repair, and maintain steam traps			11,000	\$54,581	None Immediate
3	Use supersonic oxygen lancing to improve temperature profile in cupola	2,707,000		49,000	\$465,509	\$10,000 .08
4	Optimize riser and gating sizes				\$101,099	\$5,500 .08
5	Install adjustable flow vortex nozzles to reduce compressed air use	911,000			\$396,908	\$63,070 .17
6	Insulate bare pipes				\$54,417	\$7,323 .17
7	Replace 400-watt with 360-watt metal halide lamps	1,484,000			\$57,867	\$16,000 .25
8	Fix leaks and repair insulation in preheated combustion air ducting	369,000	11,000		\$115,800	\$47,000 .42
9	Upgrade ladle heating system		24,000		\$132,000	\$70,000 .5
10	Use notched V-belts on belt-driven equipment	2,724,000			\$106,225	\$52,428 .5
11	Oxy-fuel injection system for one cupola		-17,000	-27,000	\$328,900	\$186,000 .58
12	Install cooling tower to eliminate once-through cooling for air conditioning units	-164,000			\$468,119	\$368,000 .83
13	Install isolation valves and automatic moisture traps to reduce air leaks on weekends and shutdowns	318,000			\$138,764	\$154,550 1.08
14	Install a cover and heat recovery system at ladle dry/preheat stations		11,000		\$59,000	\$100,000 1.75
15	Install VFDs on cupola forced-draft blowers	4,492,000	13,000		\$246,800	\$609,000 2.5
16	Install VFDs on cupola induced-draft blowers	4,922,000			\$192,000	\$624,000 3.25
Total for short-term projects		17,763,000	106,000	33,000	\$3,278,989	\$2,312,871 0.71
Recommendations for Long-Term Consideration						
17	Install a high-capacity cupola	8,000,000	365,000	239,000	\$9,465,659	\$24,800,000 2.58
18	Replace 400-watt mercury lights with 360-watt metal halide lights	282,000			\$11,508	\$42,468 3.67
Total for long-term projects		8,282,000	365,000	239,000	\$9,477,167	\$24,842,468 2.62
Total for all projects		26,045,000	471,000	272,000	\$12,756,156	\$27,155,339 2.13

Figura 11. Resumen de los proyectos encontrados por Plant-Wide Energy Assessment en la planta de Ford (CCP).

AMCAST y asociados aplicaron un PWA para identificar ahorros de energía en la empresa Wapakoneta en Ohio. El equipo inicialmente identificó \$USD 3.6 millones de ahorro incrementando la eficiencia tanto energética como productiva con tiempos de retorno de 0 a 29 meses [13].

Estimulados por estos resultados, AMCAST replicó la metodología aplicada de ahorro de energía en 5 plantas a través de la corporación e introdujo proyectos de evaluación en sus demás plantas. Esta metodología ha tenido éxito ya que se predice que la compañía en general llegará a tener ahorros de aproximadamente \$USD 36 millones.

La compañía Wapakoneta gasta millones de dólares en el intenso uso de energía para sus procesos de fundición de aluminio a baja presión para suspensiones automotrices. El equipo enfocó la evaluación en todos sus sistemas con altos requerimientos energéticos incluyendo hornos, calderas, equipo eléctrico, aire comprimido, ventiladores y bombas. La evaluación resultó en 12 proyectos que mejorarían la eficiencia de producción de proceso, disminución de los consumos energéticos y disminución de piezas defectuosas.

El Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) financió la valoración en \$USD 75,000 y requirió al menos una cantidad igual de AMCAST.

La Tabla 3 muestra las oportunidades de ahorro generales identificadas [13].

Tabla 3. Oportunidades de ahorro asociadas al proyecto de AMCAST Wapakoneta en EUA.

Evaluación AMCAST Wapakoneta	
Ahorro de costos	\$3.6 millones/año
Ahorros realizados en planta	\$6 millones/año
Ahorros en energía eléctrica	672,000 kWh/año
Ahorros en gas natural	96,005 MMkJ/año

Este estudio busca plantear propuestas de ahorro de energía en una planta de fundición que opera en México con poca eficiencia energética, centrándose en las áreas del proceso que desperdician mayores cantidades de energía. Dentro de los muchos tipos de fundiciones que existen actualmente operando en nuestro país, en este proyecto se analiza una planta que trabaja con el proceso conocido como Investment Casting o Cera Perdida. A continuación se describe el proceso y se desarrollan dichas propuestas.



Capítulo III

Descripción del proceso



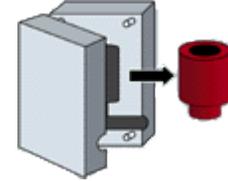
El proceso de Investment Casting o Cera Perdida

El proceso de cera perdida es complejo y requiere de múltiples etapas:

ÁREA DE CERA

1. Inyección de cera o plástico.

Consiste en realizar una réplica en cera o plástico de la pieza que se desea obtener en metal.



2. Ensamble.

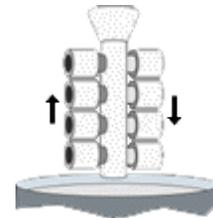
Los patrones son ensamblados a una barra central llamado “sprue” para formar un racimo de piezas ensambladas.



ÁREA DE CERÁMICA

3. Construcción cerámica.

Los moldes son sumergidos en suspensión cerámica y después cubiertos por arena extremadamente fina. Más de ocho capas de este proceso son necesarias para dar la resistencia apropiada a los moldes.



4. Descerado o extracción de plástico.

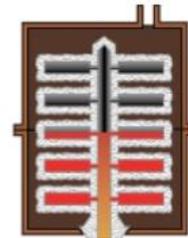
Una vez que la cerámica está seca, la cera o plástico es derretido y extraído de los moldes, creando una impresión negativa de la forma de la pieza dentro de los moldes cerámicos.



ÁREA DE FUNDICIÓN

5. Pre calentamiento de moldes.

Los moldes cerámicos necesitan ser pre calentados antes del proceso de fundición para proporcionar resistencia a choques térmicos.



6. Fundido.

En el proceso convencional, utilizado por la mayoría de las fundiciones, la cerámica es llenada por el metal fundido.



ÁREA DE ACABADO

7. Limpieza mecánica.

Cuando el metal está completamente frío y sólido, las piezas son liberadas de la cerámica mediante vibración.



8. Corte.

Las piezas son cortadas del alimentador.



9. Acabado.

Después de algunos procesos de acabado, las piezas exactamente iguales a los patrones ya sea de cera o

plástico, quedan terminadas. En esta parte del proceso se incluyen operaciones como: maquinado, inspecciones y tratamientos térmicos.

A continuación se presenta una serie de diagramas en los que se describen a mayor y menor detalle las etapas que pasan las piezas durante todo el proceso.

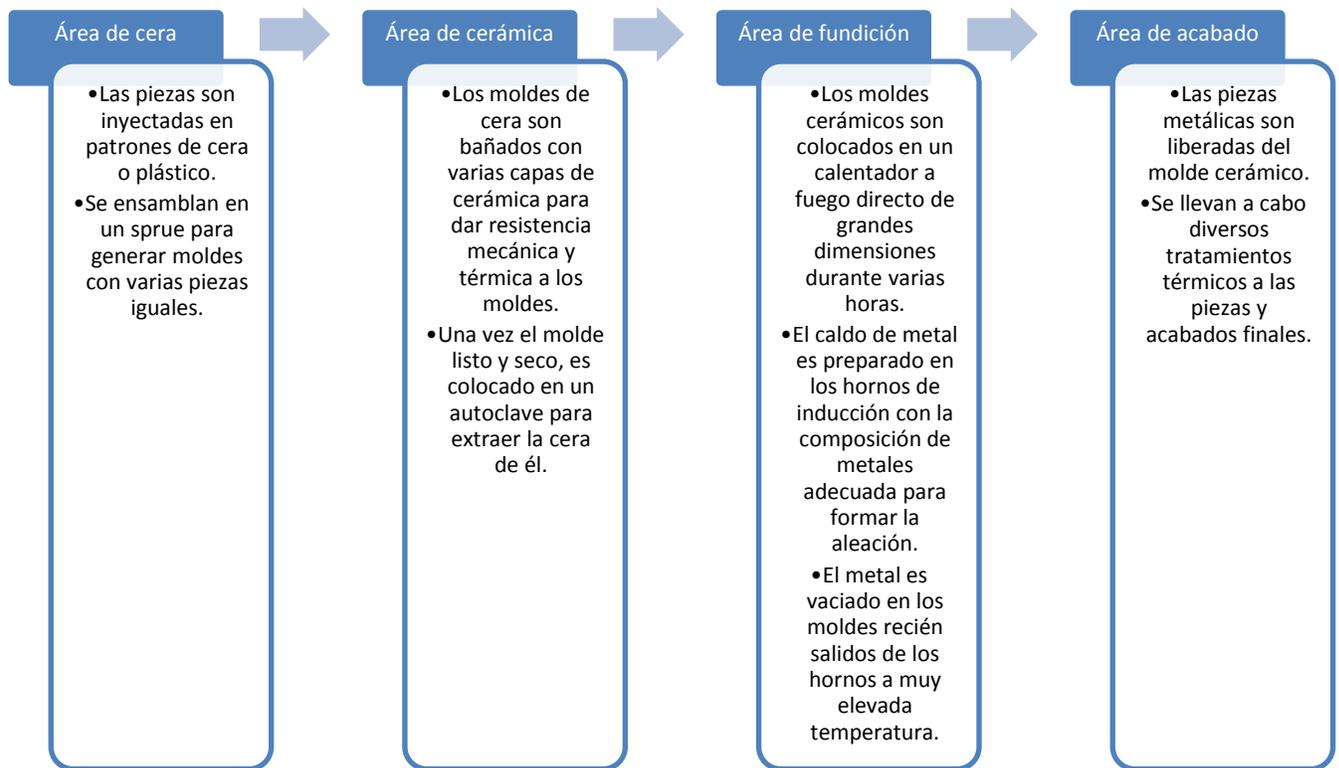


Figura 12. Diagrama de relación de cada área del proceso.

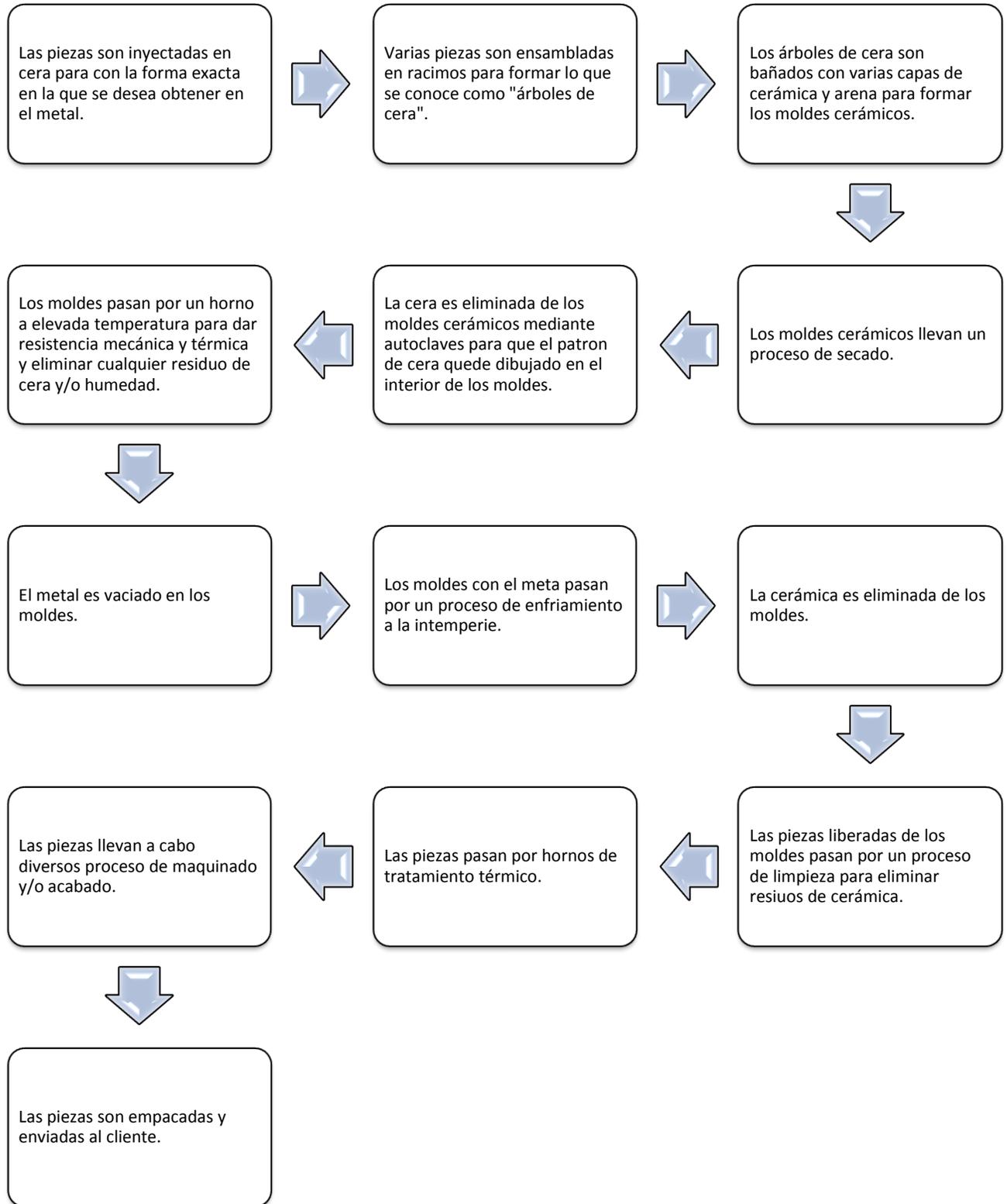


Figura 13. Secuencia de etapas por las que pasan las piezas durante el proceso.

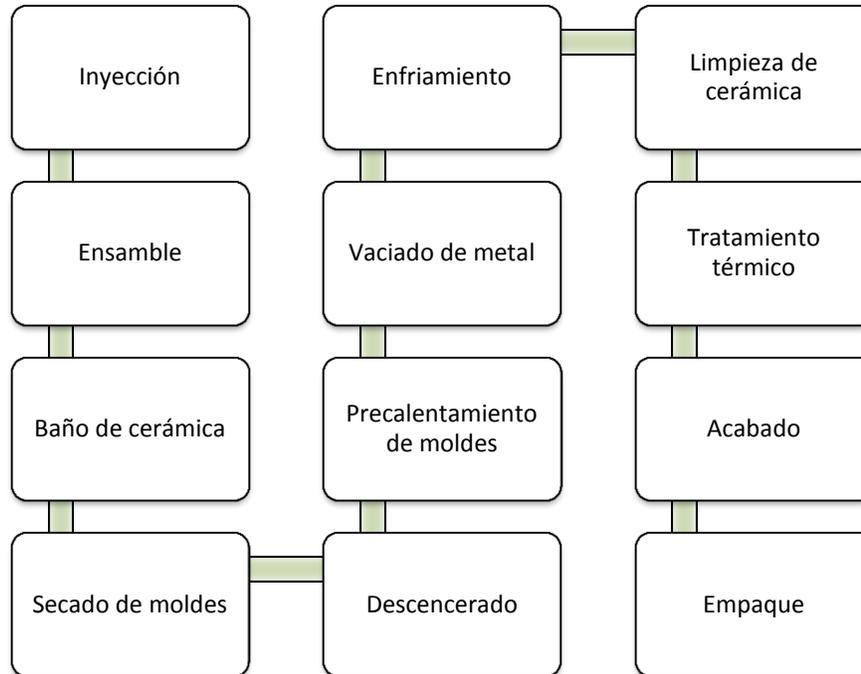


Figura 14. Diagrama conceptual del proceso de las piezas.

De acuerdo con las etapas descritas anteriormente resulta lógico imaginar que la mayor cantidad de energía desperdiciada del proceso proviene de aquél que requiere de elevadas temperaturas; el área de fundición.

Es por este motivo que dicha área será descrita con mucho más detalle y las principales propuestas de ahorro de energía se centrarán en esta etapa del proceso.

Descripción detallada del área de fundición

El proceso de fundición de cualquier industria de vaciado de metal se compone de las operaciones siguientes [3]:

1. Preparación de moldes:

En nuestro caso de estudio esta etapa es equivalente a la colocación de los moldes cerámicos ya sin cera en los hornos a fuego directo de grandes dimensiones y a muy elevadas temperaturas para proporcionarles resistencia tanto mecánica como térmica. Los moldes pasan alrededor de 4 horas dentro de estos hornos para llevar a cabo el tratamiento que necesitan y poder soportar el metal líquido cuando sea vaciado en ellos.

2. Preparación de la carga de metal:

El secado y/o precalentamiento de la carga de metal es una práctica frecuentemente utilizada en los procesos de fundición ya que ofrece varios beneficios como remover la humedad y otras partículas volátiles de la carga de metal, prevenir el riesgo de explosión en el horno, la no formación de escoria, disminución de los requerimientos energéticos del horno y el incremento de la capacidad de fundido del horno.

El precalentamiento y la remoción de contaminantes van típicamente acompañados del uso de gas natural. Algunas fundiciones emplean sistemas de precalentamiento en los que se reutilizan los gases calientes de combustión para precalentamiento y/o pre tratamiento.

Pueden existir pérdidas de energía durante la carga de material, si los hornos discontinuos se les agrega la carga fría, la operación de fundido se vuelve ineficiente ya que todo el horno junto con el metal debe calentarse y, por el contrario, una operación de fundición continua ofrece mayores eficiencias ya que no requiere de energía adicional para calentar el horno en cada colada. Sin embargo, cargar el horno implica mantenerlo abierto lo que permite el escape de energía mediante el flujo de gases de combustión y radiación.

3. Vaciado de metal:

Los hornos generalmente operan en ambientes agresivos en los que varios componentes como, metales fundidos, revestimiento de los hornos, gases atmosféricos y productos de la combustión, coexisten a temperaturas extremadamente altas.

La fundición de metal obtiene energía de combustibles sólidos como el coque o carbón, gas natural, electricidad y otras fuentes de energía. Los hornos generalmente varían en diseño, geometría, capacidad productiva, material de construcción y modo de operación (por carga o continuo). Otros factores relacionados con las fuentes de energía afectan además el diseño del horno que incluye cómo es transferida la energía a la carga de metal, cómo son removidos los gases de combustión, qué equipo de refinamiento y tratamiento debe incluir el horno y qué tan largos deben de ser los tiempos de retención del metal fundido.

4. Tratamiento del metal fundido:

Es el proceso de eliminación de gases del metal fundido, la remoción de la fase sólida indeseable (típicamente óxidos) y el acotamiento la composición de la aleación dentro de los límites deseados.

La fase líquida de metal ofrece una oportunidad crítica para refinar y maximizar la calidad de las piezas finales fundidas. Por lo tanto, procesos como la creación de la aleación, eliminación de gases, filtración, refinación y modificación de grano son usualmente llevados durante la fase líquida de metal, antes del vaciado. Durante esta etapa, la composición de metal se lleva a proporciones deseadas mediante las adiciones apropiadas.

Alear elementos como el sodio, calcio y magnesio a altas temperaturas con presiones de vapor muy elevadas y alta reactividad puede provocar su empobrecimiento con el tiempo. La pérdida de alguno de estos elementos afectará las propiedades físico-mecánicas de las piezas fundidas provocando incrementos de piezas defectuosas.

Los gases que se disuelven dentro del caldo de metal provenientes del medio ambiente, subproductos de la combustión y los recubrimientos de los hornos pueden afectar la calidad del producto final.

Eliminar los gases y filtrar las inclusiones sólidas como óxidos se ha convertido en una operación normada en las plantas de fundición de Estados Unidos. Filtros desechables para inclusiones cerámicas son un método actual para reducir costos y mejorar la calidad de las piezas fundidas. Generalmente son colocados en los rieles de los moldes para atrapar inclusiones sólidas formadas durante la transferencia de metal entre el horno y la entrada a las cavidades del molde.

La determinación del contenido de hidrógeno en las aleaciones de aluminio ha llegado a ser una operación bastante común. Actualmente, el ultrasonido está siendo explorado como un potencial reductor de la porosidad de las piezas. El desarrollo continuo de mejores tecnologías es una necesidad para monitorear la calidad del metal fundido económicamente.

La práctica actual para controlar la composición del metal fundido resulta costosa y generalmente lleva bastante tiempo ya que requiere tomar una muestra pequeña

del metal líquido y transportarla a un laboratorio para su análisis químico. Esto provoca un retraso entre la medición y la composición actual que puede generar sobre procesamiento, incremento en el consumo energético, emisiones y productos fuera de especificación que podrían ser desechados.

La compañía ERCo ha creado una tecnología llamada Laser- Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) que emplea un láser y un espectrómetro para medir in-situ y en tiempo real los constituyentes del caldo en un proceso de fundición [4]. Tecnologías como ésta pueden reducir defectos, incrementar los ciclos de operación de los hornos generando operaciones continuas y semicontinuas, incrementando los tiempos de vida de los hornos e incrementando la automatización de las operaciones.

5. Llenado de metal:

Este proceso consiste en remover el metal líquido del horno y vaciarlo en cucharones o recipientes. Algunos hornos pueden ladearse para vaciar el metal directamente a los cucharones o a hornos de retención adyacentes (hornos rotatorios). Un horno de este tipo es ideal para proveer un flujo de metal controlado y consistente de una manera segura y confiable con mínimo daño a la calidad del líquido.

6. Transporte:

El metal líquido debe ser transportado del horno de fundido al horno de retención o a las líneas de vertido. Diferentes tipos de recipientes son utilizados para vaciar el metal líquido dentro de las cavidades de los moldes. Idealmente dichos recipientes son precalentados para mantener la temperatura de vaciado requerida. Incluso algunas operaciones sobrecalientan el metal; por ejemplo: elevando la temperatura varios cientos de grados por encima de la temperatura de vaciado para alcanzar el mismo resultado. Las capacidades de los recipientes de transporte de metal varían desde 100 libras hasta 35 toneladas o más dependiendo de la capacidad de producción de la planta de fundición.

Los recipientes de transporte consumen significantes cantidades de energía ya que requieren ser precalentados y/o sobrecalentar el baño para mantener la temperatura de vaciado deseada. Adicionalmente, se generan pérdidas sustanciales

por radiación. Algunas investigaciones han encontrado que las mayores pérdidas por radiación de los recipientes ocurren a los lados del recipiente, ya que la parte superior es protegida por la capa de escoria que se forma en la parte superior del caldo. Esto quiere decir que se requiere de mejores materiales refractarios para dichos recipientes.

Las pérdidas de materia y energía durante estas operaciones representan ineficiencias que desperdician energía e incrementan los costos de operación.

La modificación de cualquiera de estas operaciones puede afectar las subsecuentes por lo que es importante analizar el impacto de cada una de las modificaciones que se propongan al proceso para asegurar que ese ahorro de energía en realidad no está siendo enviado a cualquier otro punto del proceso.

Usos energéticos en cada área del proceso

Es fácil inferir que en cada una de las etapas del proceso anteriormente descritas (cera, cerámica, fundición y acabado) se requieren diversos tipos de energía, es por ello que a continuación se analizarán los requerimientos en cada una de estas operaciones.

Se tomarán en cuenta sólo los principales tipos de energía utilizados en cada operación y de los cuales sea posible obtener ahorros. Se considerarán los siguientes tipos:

1. Energía eléctrica.
2. Energía térmica (vapor).
3. Aire comprimido.
4. Uso de combustible(s) (gas L.P, gas natural, diesel, combustóleo, carbón, etc.)

Cabe mencionar que actualmente es muy común encontrar en empresas mexicanas muy poca información sobre los consumos energéticos que llevan a cabo. Desafortunadamente, aún se debe de trabajar mucho para concientizar a la industria sobre la importancia de llevar a cabo procesos energéticamente más eficientes, lo cual conllevaría directamente a mejoras en la producción y calidad de las piezas

producidas. Los estudios e investigaciones que se han llevado a cabo en Estados Unidos en diferentes plantas de fundición, han sorprendido a los encargados de los proyectos, ya que se han obtenido beneficios que no estaban previstos y en muchas ocasiones se rebasaron las expectativas de los ahorros y beneficios esperados. Es por ello que parte del trabajo realizado en este estudio trata de demostrar a la industria de nuestro país que todavía se tiene mucho camino por recorrer en cuanto a procesos energéticamente eficientes. En el momento de recabar información se encontraron muy pocos datos sobre el proceso como flujos, temperaturas, presiones, composición, etc. Sin embargo, la poca información obtenida hizo posible el cálculo de las mejoras que aquí se presentan.

A continuación se hace un recuento de los tipos de energía que son utilizados en cada etapa del proceso y un aproximado sobre el porcentaje de contribución de cada área al consumo total de la planta.

En la Tabla 4 se hace un análisis para cada parte del proceso:

Tabla 4. Tipos de energía requeridos en cada parte del proceso de cera perdida.

No.	OPERACIÓN	TIPOS DE ENERGÍA REQUERIDOS	CONSUMO POR ETAPA [%]	CONTRIBUCIÓN AL CONSUMO DEL PROCESO [%]
1	Inyección de cera o plástico	Energía eléctrica	65	5
		Vapor	10	
		Aire comprimido	20	
		Combustible(s)	5	
2	Ensamble	Energía eléctrica	90	1
		Combustibles(s)	10	
3	Construcción cerámica	Energía eléctrica	60	5
		Vapor	40	
4	Descerado o extracción de plástico	Energía eléctrica	20	5
		Vapor	80	
5	Precalentamiento de moldes	Energía eléctrica	5	25
		Combustible(s)	95	
6	Fundido	Energía eléctrica	100	50
7	Limpieza mecánica	Energía eléctrica	100	4
8	Corte	Energía eléctrica	100	5
9	Acabado	Energía eléctrica	100	5

Se puede observar que el tipo de energía que más se consume en la planta es la energía eléctrica, ya que es de uso común para todas las áreas del proceso; sin embargo, no todos los requerimientos de energía son importantes o de la misma magnitud ya que el proceso de fundición y el área de precalentamiento de moldes se llevan aproximadamente el 75% del consumo energético de toda la planta.

El perfil típico de una planta de fundición generalmente distribuye sus consumos energéticos de acuerdo con lo mostrado en la Figura 15, lo cual respalda la información obtenida en la Tabla 4 de acuerdo con la información del caso de estudio.

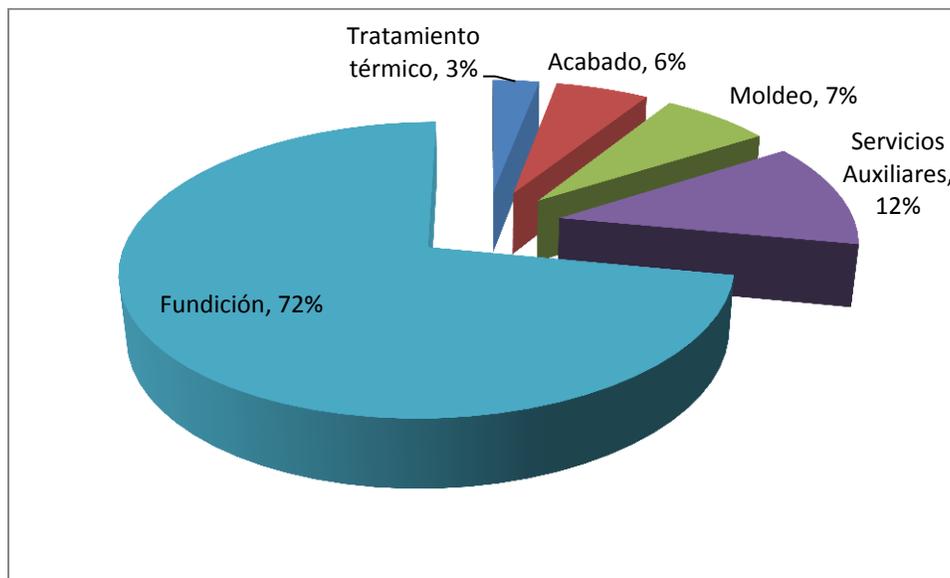


Figura 15. Perfil típico de uso de energía por proceso. *Estimado de la Tabla 11 y apéndice A [20,10]



Capítulo IV

Resultados y discusión



En cualquier proceso, es importante la identificación de las etapas que son más demandantes de energía y sus inherentes ineficiencias para centrar la atención en estos aspectos y generar ahorros de energía e incrementos en la eficiencia de los procesos.

De acuerdo con el análisis realizado al proceso descrito en el capítulo anterior y sus necesidades, se han elaborado una serie de propuestas que permitirían el ahorro sustancial de energía. En este capítulo se hace una reseña de cada una de las propuestas y se desarrollan de forma más exhaustiva las que son consideradas de mayor importancia o impacto.

A continuación se plantearán las propuestas de ahorro de energía aplicadas a los hornos de inducción en los que se prepara el metal fundido.

Oportunidades de reducción de energía

La eficiencia energética en cualquier proceso de fundición está relacionada con la cantidad de energía teórica que requiere el proceso para fundir el metal y elevar su temperatura al punto de fusión, entre la cantidad real de energía que es suministrada al sistema.

$$\text{Eficiencia energética} = \frac{\text{Energía teórica requerida}}{\text{Energía real utilizada}} * 100$$

De acuerdo con datos obtenidos en la literatura, diversos factores afectan la eficiencia del proceso de fundición en cualquier horno como los de inducción:

- Pérdidas por gases de chimenea: Están relacionadas con las descargas de calor que se hacen a la atmósfera mediante los tiros de las chimeneas. Estos gases representan la mayor cantidad de energía perdida de un horno que opera con combustible. La cantidad de energía perdida está directamente relacionada con la temperatura de los gases de combustión, su flujo másico y composición. Termodinámicamente, la temperatura siempre estará por encima de la del material que calientan. No hay manera de diseñar un horno con la temperatura de los gases de salida igual o menor a la temperatura del material que está

calentando. El diseño del horno puede controlar el flujo másico de los gases que salen del sistema, el cual es función del oxígeno requerido para quemar el flujo de combustible que entra al horno. Cuando el oxígeno para combustión es obtenido del aire, la masa de gases de combustión tiene un flujo muy grande debido a que la composición de oxígeno contenida en el aire es de sólo del 21%, el resto es nitrógeno con aprox. 78% y el resto son partículas u otros gases con una composición menor al 1%. Actualmente los gases de chimenea de todos los hornos de la planta que operan con gas son liberados a la atmósfera a temperaturas muy elevadas. Mantener las compuertas de los hornos cerradas ayuda a la disminución de la salida de dichos gases.

- Pérdidas de metal: La superficie del metal fundido se oxida formando una capa de escoria en la superficie del horno generando considerables pérdidas de metal, por lo que dichas pérdidas deberán ser reemplazadas con metal nuevo. La cantidad de metal perdido depende de la afinidad que tengan los componentes fundidos con el oxígeno y el método de fundido. Estas pérdidas de metal son un aspecto muy importante a considerar durante el diseño del horno [8]. Si las pérdidas de metal son muy grandes, el proceso podría llegar a ser muy ineficiente y poco rentable.
- Pérdidas por radiación: Éstas ocurren como energía emitida por un horno caliente y superficies cercanas. Cuando la tapa o compuerta del horno se abren para carga de material, las pérdidas de calor por radiación incrementan considerablemente. Las pérdidas por radiación de un baño sin cubrir pueden alcanzar los 130 kW/h (0.46GJ/h) para un horno de fundición de 10 TON de capacidad.
- Pérdidas por conducción y convección: Estas pérdidas pueden ser controladas mediante el uso de materiales refractarios apropiados y manteniendo la tapa ajustada al horno. Es necesario verificar que dichos aislantes se encuentren en buenas condiciones y en caso de ser necesario reemplazarlos periódicamente.
- Remoción de escoria: Ésta también puede contribuir a las pérdidas de energía. La cantidad de energía perdida depende de la temperatura, la composición de la escoria, la técnica utilizada y el tiempo que el horno permanece abierto para

que la escoria sea removida. Estas pérdidas no son lo suficientemente considerables para afectar la eficiencia del horno a menos que una gran cantidad de escoria sea removida.

La cantidad de estas pérdidas de energía varía dependiendo del diseño del horno, prácticas de operación, el metal que se está fundiendo y la fuente de energía que se utiliza. En la Tabla 5 se muestran los diferentes tipos de pérdidas de energía que se presentan en una fundición y cuánta energía utilizan. [9,10]

Tabla 5. Cantidad de energía perdida para composiciones ferrosas.

TIPO DE PERDIDA	[%]
Gases de chimenea	0-50
Escoria	0-10
Radiación/conducción/convección	10-50
Metal fundido*	40-80

*La eficiencia de fundición de las soluciones ferrosas puede ser incluso mucho menor debido al uso de energía eléctrica que involucra pérdidas inherentes a la generación y transmisión de energía eléctrica.

Otras recomendaciones concernientes al horno de inducción y la fusión de mezclas ferrosas en el área de fundición de la planta son:

- Modernizar la medición de temperatura del baño. La medición automatizada de la temperatura y potencia de los hornos de inducción ayudan a prevenir desperdicios de energía por sobrecalentamiento de la carga o exceso de potencia en el horno. El mantenimiento adecuado de este tipo de controladores ayuda tanto a ahorro de energía como aseguramiento de la calidad del producto y mayor producción. Actualmente los hornos de inducción no cuentan con un medidor eficiente de la temperatura del baño ya que el operador debe introducir un termopar para verificar que la temperatura del caldo sea la adecuada. La automatización del sistema ayudará a la disminución de pérdidas de energía, al incremento en la producción y en un mejor aseguramiento de la calidad de las piezas fundidas.
- Reducción del tiempo en el que la tapa de los hornos permanece abierta; ya sea durante la fundición del material en los hornos de inducción o mientras se

mantiene la carga fundida para nuevas coladas. Un horno con una capacidad de 12 TON pierde en promedio 14 kWh/min. [5].

- Reutilizar piezas defectuosas limpias. Las piezas con defectos son reutilizadas para generar nueva producción; sin embargo, se debe asegurar que las piezas no contengan ningún tipo de suciedad ya que cada libra de suciedad equivale a 2 libras de metal no fundido, además de que las nuevas piezas pueden contener inclusiones de material no deseado.
- Realizar un buen programa de coladas en los hornos de inducción para minimizar los tiempos de espera del material fundido.
- Mantenimiento apropiado. Reducir el tiempo que los hornos permanecen apagados ayuda al ahorro de energía ya que al arrancarlos nuevamente se consumen grandes cantidades de energía. Esto es aplicable tanto para hornos de inducción como los calentadores a fuego directo en los que se les da tratamiento a los moldes antes de ser fundidos. Actualmente la producción se planea de acuerdo a los requerimientos del cliente y los paros y arranques pueden llegar a no estar apropiadamente planeados provocando desperdicios de energía.
- Mantener las tapas ajustadas para reducir fugas de energía de los hornos (inducción o de preparación de moldes).
- Refractario. Mantener el grosor del refractario acorde a las especificaciones del fabricante para disminuir las pérdidas por paredes de los hornos.
- Eliminar puntos rojos. En muchas fundiciones se llevan a cabo inspecciones de infrarrojo para detectar problemas eléctricos y problemas en el refractario antes de alguna falla.
- Implementación de un sistema de recuperación de energía para los moldes recién fundidos. Actualmente los moldes son enfriados a la intemperie a temperaturas muy elevadas de hasta 1,500°C lo que provoca choques térmicos considerables en las piezas pudiendo afectar su estructura metálica. Debido a que la producción de dichos moldes es continua se podría diseñar un sistema a base de serpentines de agua que logren recuperar este calor y mandarlo a otras

áreas de confort para los operadores como baños y regaderas o cuartos en los que la temperatura ambiente es muy baja.

- Cambiar el uso de gas L.P. por gas natural. Actualmente los hornos de la planta operan con gas L.P. por lo que el cambio a gas natural representaría un ahorro considerable tanto monetario como ambiental. El uso de un sistema híbrido aseguraría la producción de la planta por faltas de suministro de gas natural.

En la Tabla 6 se presentan los perfiles actuales de las plantas de fundición en cuanto a energía utilizada por tonelada de metal fundido y vendido [5] comparado con los requerimientos teóricos de energía para fundir una tonelada de metal producida.

Tabla 6. Comparación entre la energía total utilizada por la planta y la energía teórica requerida.

Tipo de planta	Energía enviada a toda la planta		Fundición teórica	Eficiencia de fundición de toda la planta
	10 ⁶ kJ/TON embarcada	10 ⁶ kJ/TON fundida	10 ⁶ kJ/TON	
Hierro gris hornos de cúpula	11.2	6.6	1.266	18.9%
Hierro gris hornos de Inducción	18.7	11.2	1.266	11.3%
Tubería de hierro dúctil	6.6	6.1	1.266	20.8%
Hierro dúctil horno de inducción	7.6	4.5	1.266	27.7%
Fundición de acero de arco eléctrico	20	19.8	1.292	6.5%
Fundición a presión de Aluminio con horno de reverbero	33.4	23.4	1.040	4.4%
Moldeo de aluminio permanente con horno de reverbero	75.9	49.3	1.040	2.1%
Aluminio, espuma perdida, horno de reverbero	44.9	27.0	1.040	3.9%
Magnesio, fundición a presión, fundición eléctrica	27.1	19.0	1.129	6.0%
Cámara caliente de Zinc, fundición a presión, horno de gas	14.9	11.2	0.260	2.3%
Fundición por inducción basada en cobre	39.4	19.7	0.495	2.5%

Los procesos que consumen mayores cantidades de energía generalmente se refieren a toneladas de metal fundido en lugar de toneladas de metal vendido porque generalmente consumen el 75% de los requerimientos totales de energía, como ya se mostró en el capítulo anterior.

La energía teórica requerida para fundir y sobrecalentar el metal debe entonces estar referida al consumo de energía total, a menos que haya diferencias significativas en los procesos y la eficiencia de los métodos de fundición entre dentro de la ecuación. La energía requerida por ton de metal vendida no se discutirá en este estudio ya que está directamente relacionada con los rendimientos y/o porcentajes de piezas defectuosas. En la última columna de la Tabla 6 muestra los requerimientos de energía teóricos.

Hornos de tratamiento térmico

Una operación de tratamiento térmico es típicamente mediante un horno a fuego directo que trabaja con gas y eleva la temperatura de las piezas de metal a cierto nivel y la mantiene así durante cierto periodo de tiempo. Algunas aplicaciones específicas requieren además de temple líquido con aceites a alta temperatura. El tratamiento térmico de las piezas es llevado a cabo para diferentes aleaciones y por diferentes razones. Algunas requieren cambios estructurales en la aleación y no pueden ser llevados a cabo durante el proceso de fundición, mientras que otros son el resultado del uso de procesos de fundición no apropiados para la metalurgia de las piezas producidas. Por ejemplo, algunas piezas de acero requieren tratamiento térmico debido a tiempo insuficiente de enfriamiento durante el tiempo de moldeo mientras que otras aleaciones requieren tratamiento térmico y/o temple debido al tiempo de enfriamiento requerido por el molde.

El tiempo de enfriamiento es el periodo de tiempo entre la fundición del material y la remoción de las piezas frías del molde. Cuando el tiempo de enfriamiento es insuficiente, se requiere llevar a cabo un proceso de tratamiento térmico aparte. La mayoría de las piezas de acero requieren tratamiento térmico a dos temperaturas diferentes para asegurar las propiedades metalúrgicas de las piezas.

Tabla 7. Requerimientos de energía teóricos por tipo de metal.

Requerimientos teóricos de energía por tipo de metal			
	Acero		Hierro dúctil
Temperatura de tratamiento térmico	537 °C	954 °C	954 °C
Requerimientos teóricos de energía (10 ⁶ kJ/TON)	0.275	0.619	0.646

Suponiendo que las piezas de metal comienzan el tratamiento a temperatura ambiente, $61 \cdot 10^4$ kJ por tonelada de hierro dúctil serán requeridos para elevar su temperatura a 954°F . Por consiguiente, el tratamiento térmico del acero requerirá 0.261 y $0.587 \cdot 10^6$ kJ por tonelada o $0.847 \cdot 10^6$ kJ por tonelada de material para ser tratado térmicamente. Las eficiencias de los hornos de temple y de tratamiento térmico se encuentran en aprox. 30%, considerando el 60% de dichas pérdidas el desperdicio de la corriente de gas. Los hornos que queman gas natural típicamente contienen quemadores para aire frío, lo que implica que dichos quemadores utilizan el aire del ambiente para la combustión.

Un método que puede ser empleado para reducir el uso de gas natural es el precalentamiento del aire de combustión con la corriente de gases de escape del horno. La temperatura de los gases de escape generalmente es la misma que la temperatura de operación del horno. Para utilizar los gases de escape, se deben utilizar componentes en los quemadores que resistan las altas temperaturas e incluso sistemas automatizados para asegurar las temperaturas apropiadas para la operación de los hornos a diferentes cargas.

La temperatura del precalentamiento del aire de los quemadores de combustión está limitada también por tipo de metal con el que están hechos los intercambiadores de calor aire-aire. Muchos factores pueden influir en la energía ahorrada mediante el precalentamiento del aire de combustión; sin embargo, existen varios ejemplos en algunos estudios realizados en fundiciones de Europa que demuestran ahorros del 30% o más llevando a cabo este tipo de acciones sin cambiar las instalaciones a materiales muy exóticos o a instalaciones excesivamente costosas [17]. De acuerdo con un estudio realizado en Estados Unidos, los ahorros potenciales de energía aplicando este método, considerando que las fundiciones de acero, hierro y aluminio necesitan operaciones de tratamiento térmico se calcula que se podría ahorrar aprox. $2.234 \cdot 10^{12}$ kJ de energía como gas natural.

Otro aspecto que no está considerado en este estudio es la evaluación de los tiempos que se requiere mantener el material a las temperaturas de tratamiento térmico. Se requiere llevar a cabo proyectos de investigación en este rubro para poder alcanzar

mayores ahorros de energía mediante periodos más cortos de tiempo de los tratamientos.

Pre calentamiento de moldes

Otra de las áreas de mayor consumo de energía es el secado y pre calentamiento de moldes ya que se utilizan calentadores a fuego directo que operan a elevadas temperaturas. Estos moldes son usados para verter el metal líquido en ellos y obtener las piezas de metal con la forma deseada. Dichos moldes son típicamente fabricados de un material cerámico que es altamente resistente a temperaturas elevadas. Cuando la cerámica se termina de construir, dichos moldes deben ser secados y posteriormente calentados a temperaturas muy elevadas mediante hornos y durante cierto periodo de tiempo para dar resistencia a la cerámica tanto de choques térmicos como mecánicos. Durante este proceso es removida toda la humedad existente en los moldes. Estos hornos trabajan generalmente con gas natural, pero otros combustibles equivalentes pueden ser utilizados dependiendo del diseño del horno. Desafortunadamente, estos hornos suelen operar con eficiencias extremadamente bajas (aprox. 10%) debido a una relación pobre de aire-combustible y a otros escapes de energía como chimeneas, puertas abiertas, aislantes poco apropiados, fugas de gas, etc.

Sin embargo, mejorando la relación aire- combustible de los quemadores se podría incrementar la eficiencia de los hornos desde 10% a 30%.

Utilización de cogeneración

En esta sección se evalúa el potencial de aplicación de una planta de cogeneración que opere en las instalaciones del proceso de fundición.

Las industrias que utilizan grandes cantidades de calor para sus procesos también consumen una gran cantidad de energía eléctrica. Por lo tanto, resulta lógico aprovechar el potencial de trabajo ya existente para producir energía en vez de permitir que se desperdicie. El resultado es una central que produce electricidad mientras cubre los requerimientos de calor de dicho proceso industrial. Una central de este tipo es llamada planta de cogeneración. En general, *la cogeneración es la*

producción de más de una forma de energía (como calor de proceso y energía eléctrica) a partir de la misma fuente de energía [18].

Tanto un ciclo de turbina de vapor (Rankine) como otro de turbina de gas (Brayton), o incluso ciclo combinado (CC), pueden utilizarse como ciclos de potencia en una planta de cogeneración.

Cogeneración

La cogeneración es el proceso de producción de energía eléctrica y térmica mediante el uso de algún efluente de calor desperdiciado por el proceso con el objetivo de disminuir el flujo de combustible utilizado ya sea gas natural, gas licuado de petróleo y/o propano. La implementación de una planta de cogeneración es deseable debido a que generalmente resulta económicamente viable bajo las condiciones apropiadas. En cuanto a aspectos ambientales también resulta benéfico ya que la eficiencia de un sistema de cogeneración, con el uso de efluentes de calor desperdiciados, es mucho mayor a la eficiencia de una planta de generación eléctrica convencional. Dicho incremento en la eficiencia resulta de la disminución de las emisiones a la atmósfera y un mejor aprovechamiento del combustible.

La generación eléctrica independiente (mediante alguna planta de generación interna) sin el uso de algún efluente de calor desperdiciado puede ser favorable también cuando los costos de la energía eléctrica durante los picos de mayor intensidad son relativamente más altos que el gas natural o algún otro combustible que pueda ser utilizado para operar el generador eléctrico.

Para abordar las oportunidades descritas anteriormente, el potencial de aplicación de una planta de cogeneración y el uso de efluentes de calor desperdiciados se evalúa bajo los siguientes escenarios:

1. Turbinas o algún similar de generación a baja escala con efluentes de calor desperdiciado.
2. Recuperador de calor para producir energía útil a una temperatura más alta mediante el uso de una bomba de calor.
3. Recuperación de calor para proporcionar enfriamiento.

4. Trigeneración; generación de energía eléctrica, térmica y enfriamiento simultáneos.
5. Energía térmica y/o química almacenada en las corrientes de proceso desperdiciadas para la producción de energía.

Como se discutió anteriormente, mediante la cogeneración, se tiene la posibilidad de generar energía eléctrica y calentamiento de manera simultánea, sin embargo, cabe mencionar que existen también otros métodos de recuperación como la trigeneración que consiste en la generación de energía eléctrica, calentamiento y enfriamiento simultáneos. En este proyecto se descarta la posibilidad de analizar una planta de este tipo ya que en el proceso que se analiza en este estudio no se tienen requerimientos de enfriamiento elevado y/o considerable. En algún proceso de otro tipo se podría considerar esta posibilidad de recuperación.

Para el diseño de una planta de cogeneración, es especialmente importante determinar la carga térmica que va a entregar el sistema ya que este sistema proveerá de carga tanto eléctrica como térmica durante un periodo en específico que permita la disminución de consumo de energía y por lo tanto un ahorro económico. Una pobre planeación y diseño de la carga térmica que requiera el proceso puede impedir alcanzar las metas en cuanto a ahorros económicos y beneficios calculados para el sistema, alargando el tiempo de recuperación de la inversión y reduciendo la probabilidad de que se lleven a cabo más proyectos de ahorro de energía en el futuro.

De acuerdo con esto, para efectos de este proyecto, se consideró que toda la carga térmica de las chimeneas de los gases de combustión de alta temperatura se tiene disponible durante todo el tiempo que los hornos se encuentren en operación.

Diseño de la planta de cogeneración

Como ya se mencionó en párrafos anteriores, el primer paso para diseñar una planta de cogeneración es el cálculo de la carga térmica que se tiene disponible de los efluentes desperdiciados de energía. Para obtener dicha información, se hizo un balance de materia del flujo de combustible utilizado por el horno. El porcentaje de

exceso de aire correspondiente y la temperatura a la que dichos gases después de la combustión son liberados a la atmósfera son conocidos.

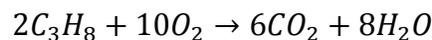
El balance de materia para encontrar el flujo de gases de combustión se calcula mediante el procedimiento descrito a continuación.

Tabla 8. Información termodinámica de los componentes del Gas L.P, aire y gases de combustión formados.

		$C_p/R = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D/T^2$			[T en K]				
Peso molecular		ΔH_{form}	ΔG_{form}	ΔS_{form}	A	B	C	D	Tmax
C_3H_8	44.10	-104.68	-24.29	-269.629	1.213	2.88E-02	-8.82E-06	0	1500
C_4H_{10}	58.12	-125.79	-16.57	-366.326	1.935	3.69E-02	-1.14E-05	0	1500
CO_2	44.01	-393.509	-394.359	2.851	5.457	1.05E-03	0	-1.16E+05	2000
N_2	28.01	0	0	0	3.28	5.93E-04	0	4.00E+03	2000
O_2	32.00	0	0	0	3.639	5.06E-04	0	-2.27E+04	2000
H_2O	18.02	-241.818	-228.572	-44.427	3.47	1.45E-03	0	1.21E+04	2000

Se fija una base de combustible y un porcentaje de exceso de aire. Posteriormente se realizan los cálculos estequiométricos de acuerdo con las reacciones químicas implicadas en la combustión completa de los gases. En este caso se considera que el gas L.P. contiene sólo propano y butano con una composición de 70-30 respectivamente.

Reacción de combustión del propano:



Reacción de combustión del butano:

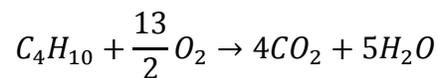


Tabla 9. Ejemplo del balance de materia realizado para calcular el flujo de gases de combustión.

	GAS L.P.		AIRE ESTEQUIOMÉTRICO		AIRE [%] EXCESO		GASES DE COMBUSTIÓN		ERROR
	Fracción mol	Flujo molar [mol/s]	Fracción mol	Flujo molar [mol/s]	Fracción mol	Flujo molar [mol/s]	Fracción mol	Flujo molar [mol/s]	
C ₃ H ₈	0.7000	70.00							
C ₄ H ₁₀	0.3000	30.00							
CO ₂							5.430%	330.00	
N ₂			0.769460	2,050.24	0.769460	4,510.52	74.224%	4,510.52	
O ₂			0.204540	545.00	0.204540	1,199.00	10.762%	654.00	
H ₂ O			0.026000	69.28	0.026000	152.41	9.584%	582.41	
SUMA	1.000	100.00	1.000	2,664.52	1.000	5,861.93	1.000	6,076.93	
EXCESO DE AIRE	120%								
C		330.00						330.00	0.00
H		860.00				304.82		1,164.82	0.00
O		0.00				2,550.41		2,550.41	0.00
N		0.00				9,021.05		9,021.05	0.00

En la Tabla 9 se muestra un ejemplo del cálculo de la composición y flujo de los gases de combustión con una base de gas L.P. de 100 mol/s. La fracción mol del gas es conocida y la del aire también; mediante las reacciones de combustión se calcula el flujo molar de aire estequiométrico y posteriormente se le agrega el porcentaje de exceso de aire que se desee. El resultado arrojará los flujos y composiciones de los gases de combustión que en este caso son CO₂, N₂, O₂, H₂O. A manera de comprobar que el balance es correcto, se debe hacer una comparación de los elementos que participan como reactivos en las reacciones con los elementos que participan como productos. Los flujos molares de cada elemento deben ser iguales a la entrada y a la salida, tal como se observa en la columna ERROR de la Tabla 9.

Todos los balances de materia que se realizaron en este estudio se basan en esta metodología de cálculo.

En la planta que se estudió se encontraron varios efluentes desperdiciados de gases de chimenea; sin embargo, los de mayor importancia son los de los hornos de precalentamiento de moldes que se encuentran en el área de fundición de la planta. Éstos equipos son básicamente calentadores a fuego directo de aproximadamente 20 m de largo por 1.5 m de alto y 1.5 m de ancho. De acuerdo con información proporcionada por la planta, se calcula el rango en el que se encuentra el flujo de

combustible utilizado, ya que dicho gasto no permanece constante debido a cambios en la producción, mantenimiento de los hornos, paros, etc. Un dato muy importante es el proporcionado por el diseño del horno que indica el flujo de combustible a capacidad máxima. Por otro lado se debe conocer el consumo promedio de combustible real del horno ya que indica el rango en el que se mantiene en flujo de gas.

En este estudio se decidió trabajar con el valor promedio del flujo de gas que consume el horno, lo que indica que se estaría operando en las condiciones mínimas de quema de combustible, es decir, sin considerar los incrementos en la capacidad del horno. Ambos valores de consumo de gas de los hornos a capacidad máxima y el consumo promedio durante a producción permiten el cálculo del *Factor de Carga* del horno del que se habló en párrafos anteriores y se dice que generalmente se encuentra en el 10% de capacidad. Para el caso de los hornos analizados en este estudio se muestra que el Factor de Carga se encuentra en el 11%.

En la Tabla 10 se muestran los datos obtenidos de las hojas de operación de los hornos de precalentamiento e moldes. Su consumo a capacidad máxima es de 83 SCFH que son equivalentes a un flujo másico de 0.3663 kg/s.

Los datos proporcionados de la planta arrojan que cada horno (se operan 2 hornos idénticos en el proceso) consume en promedio 4.48 L/min de gas, lo que equivale a 0.418 kg/s. Estos datos proporcionaron el valor de 11% como factor de carga.

Es interesante observar que este dato coincide con la información proporcionada en la literatura que menciona que generalmente en otras plantas este tipo de horno opera con eficiencias muy bajas de hasta 10%.

Tabla 10. Datos de consumo de gas L.P. para el cálculo del factor de carga de los hornos.

Peso Molecular gas	48.31	[g/mol]	Flujo volumétrico	0.0007	[m³/s]
Densidad del gas	560	[kg/m³]	Flujo másico	0.3663	[kg/s]
Consumo del horno a capacidad máxima	83	SCFH	Flujo molar	0.0076	[kmol/s]
	83.00	SCFH	Flujo molar	7.5835	[mol/s]
Consumo de la planta	13	[L/min]	Flujo volumétrico	0.0001	[m³/s]
Consumo de la caldera	4.05	[L/min]	Flujo másico	0.0418	[kg/s]
Consumo de 2 hornos	8.95	[L/min]	Flujo molar	0.0009	[kmol/s]
Consumo de 1 horno	4.48	[L/min]	Flujo molar	0.8649	[mol/s]
	0.075	[L/s]			

Cálculo del factor de carga 11%

Consumo a cap. máx/ Consumo promedio

Otro dato muy importante a considerar en las plantas industriales es el *Factor de Planta*. En la Tabla 11 se muestran los datos reales de consumo de combustible de la planta que permiten el cálculo del factor.

Tabla 11. Datos para el cálculo del factor de planta.

Factor	10,080	[min/sem]
Consumo de combustible	13	[L/min]
Consumo de combustible teórico	131,040	[L/sem]
Consumo de combustible real	110,000	[L/sem]
Factor de planta	84%	

Este resultado es congruente ya que la planta opera 3 turnos diariamente y sólo tiene paros los domingos y días festivos.

Por otra parte, la planta dispone de un equipo generador de vapor que se mantiene en constante operación para cubrir los requerimientos de energía térmica de la planta. Las características del vapor que proporciona dicho equipo, se describen en la Tabla no. 12.

Tabla 12. Datos del equipo generador de vapor.

Condiciones del agua de entrada		
Temperatura	15	[°C]
Densidad @15°C	0.958	[kg/L]
Presión	0.98	[bar]
Flujo volumétrico	3,009.00	[L/h]
Flujo másico	2,882.62	[kg/h]

	0.80	[kg/s]
Condiciones del vapor de salida		
Temperatura	150	[°C]
Presión	2.0	[kg/cm ²]
	2.00	[bar]
Flujo volumétrico	2,609.6	[L/h]
Flujo másico	2,500.00	[kg/h]
	0.69	[kg/s]

Análisis del exceso de aire

Otro dato que es muy importante en los calentadores a fuego directo es el porcentaje de exceso de aire que manejan para asegurar la combustión completa del combustible.

Como en este caso no se cuenta con el dato exacto de la relación aire/combustible que maneja el horno, se llevó a cabo un análisis de cómo se mueve el flujo de gases de combustión considerando como variable distintos porcentajes de exceso de aire.

Las Tablas 13 y 14 muestran el balance de materia con la composición final de los gases de combustión de acuerdo con el incremento de exceso de aire para un flujo de gas L.P. que se mantiene constante. Todos los balances fueron calculados de acuerdo a la metodología explicada en la Tabla 9.

Tabla 13. Balance de materia para el cálculo de flujo y composición de los gases de combustión variando el porcentaje de exceso de aire.

Exceso de aire	Gas L.P.		C ₃ H ₆		C ₄ H ₈		Aire		O ₂	N ₂		H ₂ O		Σ X _i
	[%]	[mol/s]	[kg/s]	x	[mol]	x	[mol]	[mol/s]	x _{O2}	[mol]	x _{N2}	[mol]	x _{H2O}	[mol]
0%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	23.04	0.20	4.71	0.77	17.73	0.03	0.60	1.00
10%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	25.35	0.20	5.18	0.77	19.51	0.03	0.66	1.00
20%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	27.65	0.20	5.66	0.77	21.28	0.03	0.72	1.00
30%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	29.96	0.20	6.13	0.77	23.05	0.03	0.78	1.00
40%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	32.26	0.20	6.60	0.77	24.82	0.03	0.84	1.00
50%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	34.57	0.20	7.07	0.77	26.60	0.03	0.90	1.00
60%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	36.87	0.20	7.54	0.77	28.37	0.03	0.96	1.00
70%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	39.18	0.20	8.01	0.77	30.14	0.03	1.02	1.00
80%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	41.48	0.20	8.48	0.77	31.92	0.03	1.08	1.00
90%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	43.78	0.20	8.96	0.77	33.69	0.03	1.14	1.00
100%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	46.09	0.20	9.43	0.77	35.46	0.03	1.20	1.00
110%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	48.39	0.20	9.90	0.77	37.24	0.03	1.26	1.00
120%	0.86	0.04	0.7	0.60541	0.3	0.25946	50.70	0.20	10.37	0.77	39.01	0.03	1.32	1.00

Tabla 14. Balance de materia para el cálculo de flujo y composición de los gases de combustión variando el porcentaje de exceso de aire.

Exceso de aire [%]	Gases Combustión		O ₂		N ₂		CO ₂		H ₂ O		Σ X _i [%]
	[mol/s]	[kg/s]	x _{O2}	[mol]	x _{N2}	[mol]	x _{CO2}	[mol]	x _{H2O}	[mol]	
0%	24.90	1.20	0.00	0.00	0.71	17.73	0.11	2.85	0.17	4.32	1.00
10%	27.21	1.31	0.02	0.47	0.72	19.51	0.10	2.85	0.16	4.38	1.00
20%	29.51	1.43	0.03	0.94	0.72	21.28	0.10	2.85	0.15	4.44	1.00
30%	31.82	1.54	0.04	1.41	0.72	23.05	0.09	2.85	0.14	4.50	1.00
40%	34.12	1.65	0.06	1.89	0.73	24.82	0.08	2.85	0.13	4.56	1.00
50%	36.43	1.76	0.06	2.36	0.73	26.60	0.08	2.85	0.13	4.62	1.00
60%	38.73	1.87	0.07	2.83	0.73	28.37	0.07	2.85	0.12	4.68	1.00
70%	41.04	1.98	0.08	3.30	0.73	30.14	0.07	2.85	0.12	4.74	1.00
80%	43.34	2.09	0.09	3.77	0.74	31.92	0.07	2.85	0.11	4.80	1.00
90%	45.64	2.20	0.09	4.24	0.74	33.69	0.06	2.85	0.11	4.86	1.00
100%	47.95	2.32	0.10	4.71	0.74	35.46	0.06	2.85	0.10	4.92	1.00
110%	50.25	2.43	0.10	5.18	0.74	37.24	0.06	2.85	0.10	4.98	1.00
120%	52.56	2.54	0.11	5.66	0.74	39.01	0.05	2.85	0.10	5.04	1.00

En la Figura 13 se observa el abatimiento en la composición de bióxido de carbono (CO₂) conforme se aumenta el exceso de aire mientras que la composición de los demás componentes incrementa ligeramente.

Una vez que se realizaron los balances de materia con los diferentes porcentajes de exceso de aire, se hizo la comparación con las hojas de datos de los quemadores de los hornos y se encontró que el porcentaje de exceso de aire con el que operan los hornos es de aproximadamente 30% por lo que se tomó este valor para llevar a cabo los cálculos siguientes.

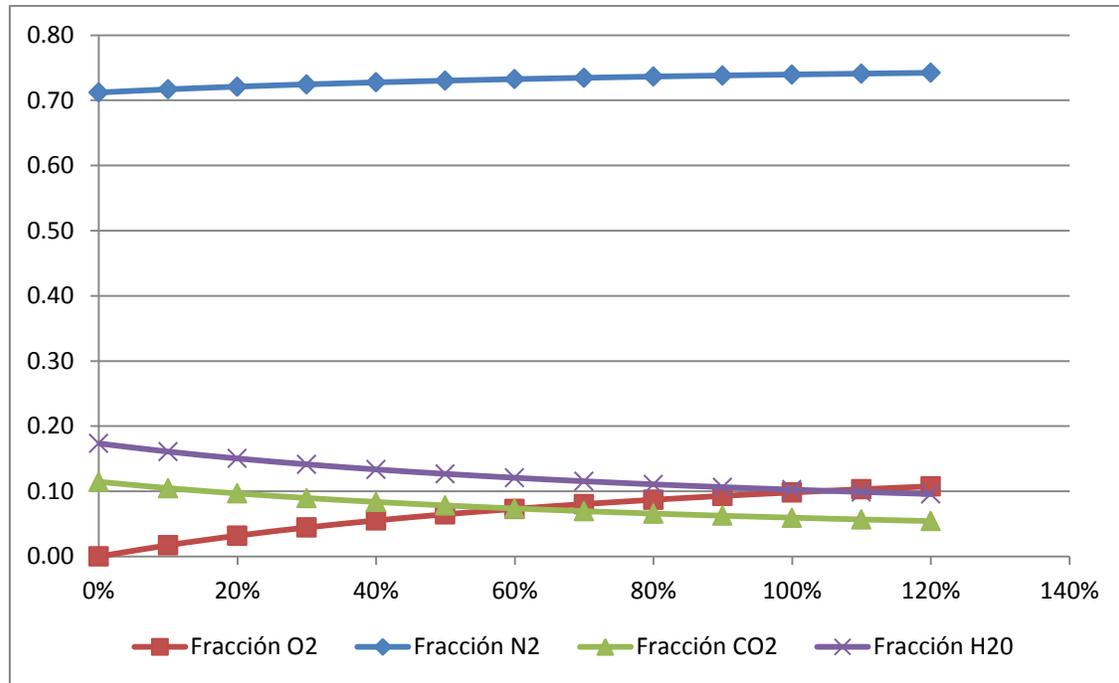


Figura 16. Comportamiento de la composición de los gases de combustión variando el porcentaje de exceso de aire.

Otro dato de vital importancia, además del exceso de aire, es que los hornos cuentan con un soplador que cumple con las siguientes funciones:

1. Dilución de los gases de combustión que salen por la chimenea.
2. Enfriamiento de la masa de gases calientes que provienen directamente de la quema de combustible a temperaturas superiores a 1,300 °C.
3. Fácil expulsión de los gases de combustión a través de la chimenea sin contaminar las entradas del horno.

Las características y flujo del soplador de aire que se encuentra instalado en el horno se muestran en la Tabla No. 15.

Tabla 15. Propiedades del aire.

Densidad @400°C	0.525	[kg/m ³]
Masa molar	28.97	[kg/kmol]
Flujo	100,000	CFM
Factor	0.0002	
Flujo másico	24.83	[kg/s]
Flujo molar	856.96	[mol/s]

Como se observa en la Tabla 15, el flujo de aire es considerable en comparación con el flujo de combustible y de gases de combustión que se tendrían si no existiera dicho equipo, por lo que fue necesario volver a realizar el balance de materia de los gases de combustión considerándolo.

Tabla 16. Balance de materia para el cálculo de flujo y composición de los gases de combustión variando el porcentaje de exceso de aire y considerando el flujo de aire del soplador.

Exceso [%]	Flujo de gas [mol/s]	C ₃ H ₆		C ₄ H ₈		Flujo de aire		O ₂		N ₂		H ₂ O		Σ X _i [%]
		x	[mol]	x	[mol]	[mol/s]	x _{O2}	[mol]	x _{N2}	[mol]	x _{H2O}	[mol]		
0%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	880.00	0.20	180.00	0.77	677.13	0.03	22.88	1.00	
10%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	882.31	0.20	180.47	0.77	678.90	0.03	22.94	1.00	
20%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	884.61	0.20	180.94	0.77	680.67	0.03	23.00	1.00	
30%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	886.92	0.20	181.41	0.77	682.45	0.03	23.06	1.00	
40%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	889.22	0.20	181.88	0.77	684.22	0.03	23.12	1.00	
50%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	891.52	0.20	182.35	0.77	685.99	0.03	23.18	1.00	
60%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	893.83	0.20	182.82	0.77	687.77	0.03	23.24	1.00	
70%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	896.13	0.20	183.30	0.77	689.54	0.03	23.30	1.00	
80%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	898.44	0.20	183.77	0.77	691.31	0.03	23.36	1.00	
90%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	900.74	0.20	184.24	0.77	693.08	0.03	23.42	1.00	
100%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	903.05	0.20	184.71	0.77	694.86	0.03	23.48	1.00	
110%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	905.35	0.20	185.18	0.77	696.63	0.03	23.54	1.00	
120%	0.86	0.7	0.6054	0.3	0.2595	907.66	0.20	185.65	0.77	698.40	0.03	23.60	1.00	

Tabla 17. Balance de materia para el cálculo de flujo y composición de los gases de combustión variando el porcentaje de exceso de aire y considerando el flujo de aire del soplador.

Exceso [%]	Gases Combustión			O ₂		N ₂		CO ₂		H ₂ O		Σ X _i [%]
	[mol/s]	[kg/s]	x _{O2}	[mol]	x _{N2}	[mol]	x _{CO2}	[mol]	x _{H2O}	[mol]		
0%	881.86	42.60	0.20	175.28	0.77	677.13	0.00	2.85	0.03	26.60	1.00	
10%	884.17	42.71	0.20	175.75	0.77	678.90	0.00	2.85	0.03	26.66	1.00	
20%	886.47	42.82	0.20	176.22	0.77	680.67	0.00	2.85	0.03	26.72	1.00	
30%	888.77	42.93	0.20	176.70	0.77	682.45	0.00	2.85	0.03	26.78	1.00	
40%	891.08	43.04	0.20	177.17	0.77	684.22	0.00	2.85	0.03	26.84	1.00	
50%	893.38	43.16	0.20	177.64	0.77	685.99	0.00	2.85	0.03	26.90	1.00	
60%	895.69	43.27	0.20	178.11	0.77	687.77	0.00	2.85	0.03	26.96	1.00	
70%	897.99	43.38	0.20	178.58	0.77	689.54	0.00	2.85	0.03	27.02	1.00	
80%	900.30	43.49	0.20	179.05	0.77	691.31	0.00	2.85	0.03	27.08	1.00	
90%	902.60	43.60	0.20	179.52	0.77	693.08	0.00	2.85	0.03	27.14	1.00	
100%	904.91	43.71	0.20	180.00	0.77	694.86	0.00	2.85	0.03	27.20	1.00	
110%	907.21	43.82	0.20	180.47	0.77	696.63	0.00	2.85	0.03	27.26	1.00	
120%	909.51	43.93	0.20	180.94	0.77	698.40	0.00	2.85	0.03	27.32	1.00	

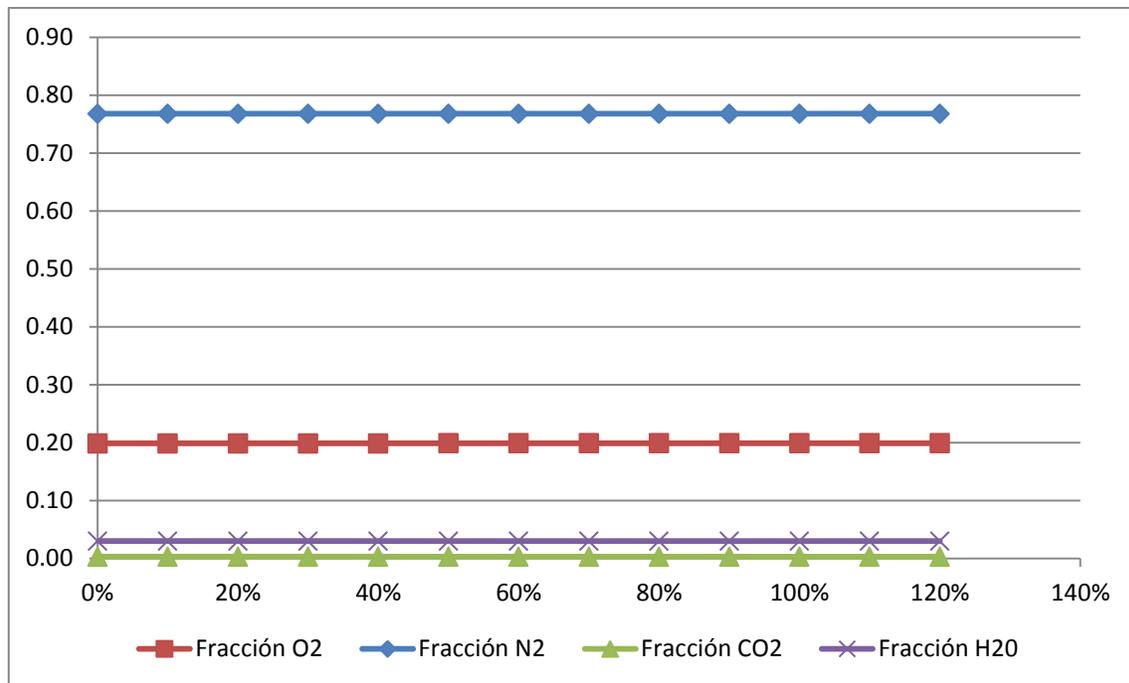


Figura 17. Comportamiento de la composición de los gases de combustión variando el porcentaje de exceso de aire considerando el flujo del soplador.

Como se puede observar en la Figura 14, la composición de los gases de chimenea es prácticamente la composición de aire, ya que el flujo y composición de los gases productos de la combustión queda completamente diluida por el exceso de aire para llevar a cabo la combustión y por el soplador.

Como ya se mencionó anteriormente, una de las funciones del soplador de aire en las chimeneas, es el enfriamiento de la masa de gases, los cuales realmente poseen temperaturas muy elevadas de hasta 1000°C . Es por ello que mediante el simulador de procesos energéticos THERMOFLEX se realizó un análisis comparativo entre la generación de energía eléctrica mediante un ciclo Rankine convencional con el flujo de gases de chimenea con soplador y sin soplador. En las Tablas 18 y 19 se muestran los resultados de la generación de energía eléctrica bajo ambas condiciones de flujo y temperatura.

Tabla 18. Generación de energía eléctrica mediante un ciclo Rankine convencional con gases a elevada temperatura y menor flujo.

Rankine	T	P	M	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	Energía Eléctrica	Auxiliares	Consumo de Agua
Sin soplador	[°C]	[bar]	[kg/s]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kW]	[kW]	[kg/s]
Gas L.P + 10% exceso aire	800	1.5	1.31	2%	72%	10%	16%	306.8	4.320	0.0377
Gas L.P + 30% exceso aire	800	1.5	1.54	4%	72%	9%	14%	356.5	5.008	0.0438
Gas L.P + 60% exceso aire	800	1.5	1.87	7%	73%	7%	12%	427.6	5.993	0.0524
Gas L.P + 90% exceso aire	800	1.5	2.20	9%	74%	6%	11%	500.1	6.994	0.0612
Gas L.P + 120% exceso aire	800	1.5	2.54	11%	74%	5%	10%	573.9	8.011	0.0702

Tabla 19. Generación de energía eléctrica mediante un ciclo Rankine convencional con gases a menor temperatura pero mayor flujo debido al soplador de aire.

Rankine	T	P	M	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	Energía Eléctrica	Auxiliares	Consumo de Agua
Con soplador	[°C]	[bar]	[kg/s]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kW]	[kW]	[kg/s]
Gas L.P + 10% exceso aire	450	1.5	42.71	19.878%	77%	0.323%	3%	2,678.3	37.65	0.3610
Gas L.P + 30% exceso aire	450	1.5	42.93	19.881%	77%	0.321%	3%	2,696.0	37.90	0.3634
Gas L.P + 60% exceso aire	450	1.5	43.27	19.885%	77%	0.319%	3%	2,721.4	38.25	0.3668
Gas L.P + 90% exceso aire	450	1.5	43.60	19.890%	77%	0.316%	3%	2,746.8	38.60	0.3702
Gas L.P + 120% exceso aire	450	1.5	43.93	19.894%	77%	0.314%	3%	2,773.0	38.97	0.3737

Es muy interesante observar que aunque la temperatura de los gases sea muy elevada (al doble) la generación de energía eléctrica es considerablemente menor comparada con la energía generada a menor temperatura y mayor flujo. Este análisis descartó la posibilidad de eliminación de este equipo sobre las chimeneas de los hornos.

De acuerdo con estos resultados se decidió considerar como fuente de producción de energía eléctrica un efluente de gases de combustión con las siguientes características:

Tabla 20. Características de los gases de chimenea.

GASES DE COMBUSTIÓN		
Peso molecular promedio	28.4	[g/mol]
Flujo másico	42.9	[kg/s]
Flujo molar	888.8	[mol/s]
Composición	O ₂	0.1988 [%]
	CO ₂	0.0032 [%]
	N ₂	0.7679 [%]
	H ₂ O	0.0301 [%]
Temperatura	450	[°C]
Presión	0.7	[bar]

Diseño de las configuraciones

La base de diseño de las configuraciones de la planta de cogeneración son los gases de combustión que salen de los hornos de precalentamiento de moldes. Ambos operan simultáneamente durante la producción normal y tienen paros ocasionales y programados por lo que se considera que ambos hornos se mantendrán en operación constante.

Para cubrir los requerimientos de vapor a proceso actualmente se cuenta con una caldera que entrega vapor a 150° C y 2 bar de presión de manera constante a razón de 2.5 TON/h. Dicho vapor es enviado para servicios, autoclaves y tanques de deshidratación. Las configuraciones fueron diseñadas para extraer el vapor a estas condiciones de la turbina y enviarlo a proceso.

Se tomó como base la configuración de los ciclos Rankine y Combinado para la generación de energía eléctrica. Se busca satisfacer las necesidades eléctricas de la planta en su totalidad, la cual tiene una capacidad instalada de 5 MWe y 3.1 MWt. En caso de obtener un sobrante de energía se planea enviarlo a otra planta de la misma compañía que opera en otro estado de la república.

Se diseñaron 10 configuraciones diferentes en el programa THERMOFLEX, 4 para ciclo Rankine y 6 para Ciclo Combinado.

A continuación se hace una breve descripción de cada una de las configuraciones diseñadas. En los Anexos A1 -A11 se pueden observar los diagramas correspondientes a cada una de las configuraciones.

Ciclos Rankine

Considerando las salidas de los gases de chimenea de los hornos, se diseñaron 4 configuraciones de ciclo Rankine que se componen básicamente de una turbina de vapor, un condensador, una bomba y una caldera. El vapor requerido por el proceso es obtenido mediante una extracción de la turbina a la presión necesaria. Como el flujo de esta corriente es muy pequeño, el resto se sigue expandiendo en un proceso de condensación para continuar con la generación de energía eléctrica. Un porcentaje del

vapor utilizado por el proceso es regresado y unido a la corriente de salida de la turbina para ser enviado al condensador que opera mediante un ciclo con una torre de enfriamiento. Esta corriente es regenerada con una corriente de agua para volver a llevar a cabo el ciclo.

La diferencia entre las 4 configuraciones anteriores es la forma en la que se continúa con la expansión del vapor después de ser utilizado por el proceso y el precalentamiento de los gases de combustión antes de entrar al ciclo. Es evidente esperar que los gases precalentados mediante un combustor generen mayor electricidad que los que entran al ciclo tal cual como vienen del proceso; sin embargo, esta corriente de gas extra que se está considerando para este proceso es del flujo de gas que se ahorraría mediante la eliminación de la caldera que se tiene instalada en la planta.

Configuración 1. Ciclo Rankine con turbinas en serie. No utiliza combustible. Se compone de una turbina de vapor y de ella se obtiene una extracción a proceso.

Tabla 21. Condiciones de la configuración 1.

CONFIGURACIÓN 1		
Gases entrada		
Temperatura	[°C]	450
Presión	[bar]	0.7454
Flujo	[kg/s]	42.93
Vapor generado		
Temperatura	[°C]	435
Presión	[bar]	40
Flujo	[kg/s]	7.265
Vapor a proceso		
Temperatura	[°C]	120.2
Presión	[bar]	2
Flujo	[kg/s]	0.7004

Configuración 2. Ciclo Rankine con turbinas en paralelo. No utiliza combustible. Se compone de una turbina de vapor y de ella se obtiene una extracción a proceso.

Tabla 22. Condiciones de la configuración 2.

CONFIGURACIÓN 2		
Gases entrada		
Temperatura	[°C]	450
Presión	[bar]	0.7454
Flujo	[kg/s]	42.93
Vapor generado		

Temperatura	[°C]	435
Presión	[bar]	40
Flujo	[kg/s]	7.265
Vapor a proceso		
Temperatura	[°C]	120.2
Presión	[bar]	2
Flujo	[kg/s]	0.7004

Configuración 3. Ciclo Rankine con turbinas en serie y combustor. Utiliza un flujo de combustible de 0.1266 ks/s.

Tabla 23. Condiciones de la configuración 3.

CONFIGURACIÓN 3		
Gases entrada		
Temperatura	[°C]	450
Presión	[bar]	0.7454
Flujo	[kg/s]	42.93
Vapor generado		
Temperatura	[°C]	500
Presión	[bar]	40
Flujo	[kg/s]	9.401
Vapor a proceso		
Temperatura	[°C]	154
Presión	[bar]	2
Flujo	[kg/s]	0.7004

Configuración 4. Ciclo Rankine con turbinas en paralelo y combustor. Utiliza un flujo de combustible de 0.1266 kg/s.

Tabla 24. Condiciones de la configuración 4.

CONFIGURACIÓN 4		
Gases entrada		
Temperatura	[°C]	450
Presión	[bar]	0.7752
Flujo	[kg/s]	42.93
Vapor generado		
Temperatura	[°C]	500
Presión	[bar]	40
Flujo	[kg/s]	9.401
Vapor a proceso		
Temperatura	[°C]	154
Presión	[bar]	2
Flujo	[kg/s]	0.7004

Ciclos combinados

Se diseñaron además seis configuraciones diferentes de ciclo combinado en las cuales los gases de chimenea entran directamente a un compresor, después pasan a una turbina de gas y de ahí son enviados al proceso de ciclo Rankine como el descrito anteriormente. Las diferencias específicas entre cada configuración son descritas en los párrafos siguientes.

Configuración 5. Ciclo Combinado con turbinas en serie.

Los gases de combustión entran directamente al compresor a temperatura alta (450°C y 1.5 bar) y son enviados a la turbina de gas a condiciones de 1,252 °C y 22.36 bar para después entrar al ciclo Rankine. Dentro del ciclo Rankine, el vapor generado por la caldera es expandido primero y después se extrae la corriente requerida por el proceso y el resto continúa expandiéndose de igual manera para generar mayor cantidad de energía eléctrica. No utiliza flujo de combustible.

Tabla 25. Condiciones de la configuración 5.

CONFIGURACIÓN 5		
Gases entrada		
Temperatura	[°C]	450
Presión	[bar]	1.5
Flujo	[kg/s]	42.93
Vapor generado		
Temperatura	[°C]	422.8
Presión	[bar]	40
Flujo	[kg/s]	6.841
Vapor a proceso		
Temperatura	[°C]	120.2
Presión	[bar]	2
Flujo	[kg/s]	0.7005

Configuración 6. Ciclo Combinado con turbinas en paralelo.

De igual manera que en el ciclo anterior, los gases de combustión entran directamente al compresor a temperatura alta (450°C) y son enviados a la turbina de gas para después entrar al ciclo Rankine. Dentro del ciclo Rankine, el vapor generado por la

caldera es dividido entre el vapor requerido por el proceso y el resto del vapor generado, ambos son expandidos mediante turbinas de vapor. No utiliza flujo de combustible.

Tabla 26. Condiciones de la configuración 6.

CONFIGURACIÓN 6		
Gases entrada		
Temperatura	[°C]	450
Presión	[bar]	1.5
Flujo	[kg/s]	42.93
Vapor generado		
Temperatura	[°C]	422.8
Presión	[bar]	40
Flujo	[kg/s]	6.841
Vapor a proceso		
Temperatura	[°C]	120.2
Presión	[bar]	2
Flujo	[kg/s]	0.7005

Configuración 7. Ciclo Combinado con turbinas en serie y combustor.

Esta configuración es idéntica a la configuración 5 excepto porque la salida de los gases de la turbina de gas son enviados a un combustor para incrementar su temperatura antes de entrar al ciclo Rankine. La corriente de combustible permite a los gases de combustión alcanzar una temperatura de 515°C. Utiliza un flujo de combustible de 0.1344 kg/s.

Tabla 27. Condiciones de la configuración 7.

CONFIGURACIÓN 7		
Gases entrada		
Temperatura	[°C]	450
Presión	[bar]	1.5
Flujo	[kg/s]	42.93
Vapor generado		
Temperatura	[°C]	500
Presión	[bar]	40
Flujo	[kg/s]	9.412
Vapor a proceso		
Temperatura	[°C]	154
Presión	[bar]	2
Flujo	[kg/s]	0.7002

Configuración 8. Ciclo Combinado con turbinas en paralelo y combustor.

Esta configuración es idéntica a la configuración 6 excepto porque la salida de los gases de la turbina de gas son enviados a un combustor para incrementar su temperatura antes de entrar al ciclo Rankine. Utiliza un flujo de combustible de 0.1344 kg/s.

Tabla 28. Condiciones de la configuración 8.

CONFIGURACIÓN 8		
Gases entrada		
Temperatura	[°C]	450
Presión	[bar]	1.5
Flujo	[kg/s]	42.93
Vapor generado		
Temperatura	[°C]	500
Presión	[bar]	40
Flujo	[kg/s]	9.412
Vapor a proceso		
Temperatura	[°C]	154
Presión	[bar]	2
Flujo	[kg/s]	0.7002

Configuración 9. Ciclo Combinado con turbinas en serie, combustor y precalentador de aire.

Esta configuración es diferente a todas las anteriores debido a que la corriente de entrada es un flujo de aire que entra directamente al compresor a temperatura ambiente (20°C, 1.5 bar a razón de 50 kg/s) la salida de este fluido a alta presión (23.64 bar y 415°C) es precalentada con los gases de combustión antes de entrar a la turbina de gas (se eleva a 445°C) posteriormente son expandidos (disminuye la presión a 0.7877 bar y temperatura a 33.4°C) y calentados nuevamente con los mismos gases de chimenea hasta 427.4°C y posteriormente son calentados nuevamente con un combustor a 515°C para entrar al ciclo Rankine. Las turbinas de vapor en el ciclo Rankine son colocadas en serie como en los arreglos 1, 3, 5 y 7. Utiliza un flujo de combustible de 0.0992 kg/s. Ver el diagrama del proceso en el ANEXO A9.

Tabla 29. Condiciones de la configuración 9.

CONFIGURACIÓN 9		
Gases entrada		
Temperatura	[°C]	450
Presión	[bar]	0.7603
Flujo	[kg/s]	42.93
Vapor generado		
Temperatura	[°C]	500
Presión	[bar]	40
Flujo	[kg/s]	5.482
Vapor a proceso		
Temperatura	[°C]	154
Presión	[bar]	2
Flujo	[kg/s]	0.7001

Configuración 10. Ciclo Combinado con turbinas en paralelo, combustor y precalentador de aire.

Esta configuración es idéntica a la configuración 9 excepto porque las turbinas de vapor en el ciclo Rankine son colocadas en paralelo como en las configuraciones 2, 4, 6 y 8. Utiliza un flujo de combustible de 0.0992 kg/s.

Tabla 30. Condiciones de la configuración 10.

CONFIGURACIÓN 10		
Gases entrada		
Temperatura	[°C]	450
Presión	[bar]	0.7603
Flujo	[kg/s]	42.93
Vapor generado		
Temperatura	[°C]	500
Presión	[bar]	40
Flujo	[kg/s]	5.482
Vapor a proceso		
Temperatura	[°C]	154
Presión	[bar]	2
Flujo	[kg/s]	0.7001

Creación de la configuración 17

Como era de esperarse, todas las configuraciones de los ciclos combinados son extremadamente ineficientes por la entrada de los gases calientes al compresor, de

hecho, el 99% de la potencia generada por la turbina es requerida por el compresor, es por ello que todas estas configuraciones fueron descartadas en el momento de tomar una decisión; sin embargo, con el objetivo de disminuir la potencia del compresor en estas configuraciones, se diseñó la configuración 17 (las configuraciones 11 a 16 fueron intentos fallidos que no vale la pena mencionar ni explicar) la cual tiene como principio básico el interenfriamiento de los gases de combustión entre etapas de compresión.

Los gases de chimenea entran directamente a un ciclo Rankine a temperatura elevada (450°C y 1.5 bar), este ciclo genera electricidad mediante la turbina de vapor y los gases son enfriados de 450° C hasta 180°C para entrar a una primera etapa de compresión en la que se calientan hasta 573°C a una presión de 12 bar, posteriormente son enviados nuevamente a un ciclo Rankine para generar más electricidad y ser enfriados hasta 136°C; después, pasan a una segunda etapa de compresión para llegar a una presión final de 23 bar y elevan su temperatura a 231°C. Debido a que esta temperatura es muy baja para entrar a una turbina de gas, los gases son precalentados en un combustor hasta 1267.8°C y a esta temperatura y a la presión de 22.36 bar entran a la turbina de gas y salen a 0.7454 bar y 473.6°C para entrar a un último ciclo Rankine. Cabe recordar que el objetivo de enfriar los gases antes de entrar a las etapas de compresión es el de reducir la potencia utilizada por los compresores antes de entrar a la turbina y que ésta genere mayor electricidad neta. Este ciclo utiliza un flujo de combustible de 2.271 kg/s.

En los resultados se puede observar la mejora en cuanto a eficiencia de ciclo y energía generada. Ver el diagrama del proceso en el ANEXO A9.

Tabla 31. Condiciones de la configuración 17.

CONFIGURACIÓN 17				
Gases entrada				
Temperatura	[°C]	450		
Presión	[bar]	0.7603		
Flujo	[kg/s]	42.93		
Vapor generado				
Temperatura	[°C]	435	510	459
Presión	[bar]	40	40	40

Flujo	[kg/s]	7.262	11.55	8.761
Vapor a proceso				
Temperatura	[°C]	154		
Presión	[bar]	2		
Flujo	[kg/s]	0.7001		

Resumen y comparación de los resultados de la simulaciones

Una vez llevadas a cabo todas las corridas de las configuraciones mencionadas anteriormente se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 32.

Tabla 32. Tabla comparativa de los resultados de las simulaciones en TERMOFLEX de cada una de las configuraciones.

CONFIGURACIÓN		CONSUMO AGUA	AUXILIARES	GENERACIÓN NETA DE E.E		GENERACIÓN BRUTA DE E.E		FLUJO DE GAS EXTRA
		[kg/s]	[kW]	[kW]	[MWe]	[kW]	[MWe]	[kg/s]
RANKINE	1	0.3756	283.2	6,461	6.5	6,744	6.7	-
	2	0.3756	283.4	6,476	6.5	6,759	6.8	-
	3	0.3677	390.7	9,294	9.3	9,685	9.7	0.1266
	4	0.3677	390.6	9,270	9.3	9,660	9.7	0.1266
COMBINADO	5	0.3868	273.7	6,726	6.7	7,000	7.0	-
	6	0.3868	273.9	6,740	6.7	7,014	7.0	-
	7	8,237	386.3	9,303	9.3	9,689	9.7	0.1344
	8	0.3867	386.6	9,312	9.3	9,709	9.7	0.1344
	9	4,521	228.8	6,073	6.1	6,302	6.3	0.0992
	10	0.3866	229.0	6,081	6.1	6,309	6.3	0.0992
*	17	19,118	10,312	68,213	68.2	78,525	78.5	2.271

Es interesante observar que la mayor cantidad de energía eléctrica que se genera en los ciclos tanto Rankine como Combinado es de 9.3 MWe; sin embargo, con la configuración 17, se logra incrementar la generación de energía hasta más de 68 MWe. En cuanto a la generación de vapor a proceso, con todas las configuraciones se logra cubrir las necesidades en su totalidad excepto con las no. 1, 2, 5 y 6 ya que en la Tabla 33 se muestra que dichas configuraciones no alcanzan la temperatura del vapor requerida por el proceso de 150 °C.

Tabla 33. Tabla comparativa de los resultados de las simulaciones en TERMOFLEX de cada una de las configuraciones (continuación).

CONFIGURACIÓN	ENERGÍA TÉRMICA A PROCESO			VAPOR GENERADO DEL CICLO			VAPOR A PROCESO		
	[kW]	[MWt]	[°C]	[bar]	[kg/s]	[°C]	[bar]	[kg/s]	
RANKINE	1	2,490	2.5	435	40	7.265	120	2	0.7004
	2	2,490	2.5	435	40	7.265	120	2	0.7004
	3	3,070	3.1	500	40	9.410	154	2	0.7004
	4	3,070	3.1	500	40	9.410	154	2	0.7004
COMBINADO	5	3,461	3.5	423	40	6.841	120	2	0.7005
	6	3,461	3.5	423	40	6.841	120	2	0.7005
	7	3,529	3.5	500	40	9.412	154	2	0.7002
	8	3,529	3.5	500	40	9.412	154	2	0.7002
	9	3,529	3.5	500	40	5.482	154	2	0.7001
	10	3,529	3.5	500	40	5.482	154	2	0.7001
*	17	5,474	5.5	435	40	7.262	154	2	0.7000
				459	40	8.761			

Análisis de resultados basado en la Primera Ley de la Termodinámica

Para tener otros parámetros de comparación, se realizaron análisis de eficiencia de ciclo de primera ley. En la Tabla 34 se puede observar que las configuraciones 3, 4, 7 y 8 son las más eficientes con un 21% y con la configuración 17 se logra incrementar este valor hasta 45%. Las ecuaciones fueron calculadas mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Eficiencia de primera Ley} = \frac{\text{Generación eléctrica neta}}{\text{Energía gases de combustión} + \text{Combustible}}$$

$$\text{Eficiencia de cogeneración} = \frac{\text{Energía Eléctrica} + \text{Energía térmica}}{\text{Combustible}}$$

$$\text{Eficiencia bruta} = \frac{\text{Generación bruta}}{\text{Combustible}}$$

$$\text{Eficiencia neta} = \frac{\text{Generación neta}}{\text{Combustible}}$$

Tabla 34. Resultados de las eficiencias de ciclo.

CONFIGURACIÓN		EFICIENCIA DE PRIMERA LEY	EFICIENCIA DE COGENERACIÓN	EFICIENCIA BRUTA	EFICIENCIA NETA
		η_I	η_{CHP}	η_{BRUTA}	η_{NETA}
RANKINE	1	17%	-	-	-
	2	17%	-	-	-
	3	21%	195%	153%	147%
	4	21%	195%	152%	146%
COMBINADO	5	18%	-	-	-
	6	18%	-	-	-
	7	21%	191%	144%	138%
	8	21%	191%	144%	138%
	9	14%	193%	127%	122%
	10	14%	194%	127%	122%
*	17	45%	65%	69%	60%

Nótese que para valores de eficiencia de cogeneración, bruta y neta se obtienen resultados por encima del 100%, esto es debido a que se están aprovechando efluentes desperdiciados de gran calidad energética pero en las ecuaciones sólo se considera la aportación de combustible. Por eso en las configuraciones que no utilizan combustible como la 1,2, 5 y 6 no es posible obtener un resultado, toda la energía generada por estos ciclos es aprovechada por efluentes desperdiciados.

Análisis exergetico

Se llevó a cabo un análisis de exergía destruida entre las mejores opciones de ciclo Rankine y Ciclo Combinado, es decir las configuraciones 3 y 8. Los diagramas con la numeración de las corrientes se muestran en los ANEXOS B1 Y B2.

En la Tabla 35 se muestran las propiedades de las corrientes que corresponden a la configuración 3.

Tabla 35. Propiedades de las corrientes de la configuración 3.

FLUJOS	TEMPERATURA	PRESIÓN	FLUJO MÁSSICO	ENTALPÍA	ENTROPÍA
	[°C]	[bar]	[kg/s]	[kJ/kg]	[kJ/kg K]
1	450.0	0.7752	42.93	442.67	0.974
2	450.0	0.7752	42.93	442.67	0.974
3	450.0	0.7752	85.86	442.67	0.974
4	515.0	0.7454	85.99	515.47	1.083
5	450.3	0.7429	85.99	444.43	0.987

6	271.5	0.7379	85.99	253.32	0.677
7	158.0	0.7354	85.99	135.59	0.429
8	25.0	20.6800	0.13	50,047	9.072
9	34.9	41.6200	10.93	149.70	0.50237
10	246.5	40.8000	10.93	1068.80	2.76062
11	251.5	40.8000	1.53	1093.07	2.80708
12	101.5	1.0690	0.45	2678.17	7.3365
13	101.5	1.0690	1.08	425.36	1.3237
14	251.5	40.8000	9.40	2799.80	6.0601
15	500.0	40.0000	9.40	3444.77	7.0919
16	154.0	2.0000	9.40	2776.63	7.299544
17	154.0	2.0000	0.70	2776.63	7.30032
18	154.0	2.0000	8.70	2776.63	7.30032
19	38.7	0.0689	8.70	2348.62	7.5666
20	154.0	2.0000	0.14	2776.63	7.30032
21	154.0	2.0000	0.35	2776.63	7.30032
22	38.7	0.0689	0.05	162.19	0.55505
23	154.0	2.0000	0.21	2776.63	7.30032
24	38.7	0.0689	0.19	162.19	0.55505
25	38.7	0.0689	8.94	2289.54	7.37690
26	23.9	1.6320	455.80	100.30	0.35176
27	13.9	0.7354	455.80	58.33	0.20844
28	13.9	2.5290	455.80	58.56	0.20841
29	38.7	0.0689	8.94	162.19	0.55505
30	15.0	0.0689	1.99	62.94	0.22460
31	34.4	0.0689	10.93	144.13	0.49730
32	34.4	0.0689	10.93	144.13	0.49730

La Tabla 36 muestra el calor y trabajo de cada equipo de la configuración 3 calculados de acuerdo con la Ley de los signos que establece que el calor que entra a un sistema es positivo y trabajo que entra a un sistema es negativo.

En la Tabla 37 se observa la exergía destruida o trabajo perdido. Como era de esperarse, el condensador y el economizador presentan la mayor cantidad de exergía destruida con una cuenta de más del 50% de toda la exergía destruida del ciclo debido a la diferencia de temperaturas que ambos presentan entre las corrientes en contacto. La exergía destruida total del ciclo es de 4.4 MW.

Tabla 36. Analisis de exergía destruida de los equipos que conforman la configuración 3.

Equipo	Corrientes		ΔH [kJ/s]	ΔS [kJ/s K]	ΔEx [kJ/s]	Text [K]	Q [kJ/s]	W [kJ/s]
	Entrada	Salida						
Economizador	9	10	10,045.8	24.7	2,834.7	485.7	10,045.8	
Recalentador	10	14 y 11	16,311.3	26.8	8,482.5	629.8	16,311.3	
Sobrecalentador	14	15	6,063.4	9.7	3,229.5	755.3	6,063.4	
Turbina Vapor I	15	16	-6,281.2	2.0	-6,851.5			-6,281.2
Turbina Vapor II	18	19	-3,723.7	2.3	-4,400.5			-3,723.7

Condensador	25	29	-19,022.8	-61.0	-1,201.3	292.0	-19,022.8
Bomba	32	9	60.9	0.1	44.7		60.9
TOTAL							13,397.7 -9,944.0

Tabla 37. Analisis de exergía destruida de los equipos que conforman la configuración 3 (continuación).

Equipo	Weq [kJ/s]	Sgen [kJ/s K]	(Weq)min [kJ/s]	Wp [kJ/s]	Irreversibilidades
Economizador	4,003.0	4.0	2,834.7	1,168.2	26.6% Transferencia de calor a través de gradientes de temperatura.
Recalentador	8,745.4	0.9	8,482.5	262.9	6.0% Transferencia de calor a través de gradientes de temperatura.
Sobrecalentador	3,718.2	1.7	3,229.5	488.7	11.1% Transferencia de calor a través de gradientes de temperatura.
Turbina Vapor I	6,281.2	2.0	-6,851.5	570.3	13.0% Expansión súbita.
Turbina Vapor II	3,723.7	2.3	-4,400.5	676.8	15.4% Expansión súbita.
Condensador	8.4	4.1	-1,201.3	1,209.7	27.5% Transferencia de calor a través de gradientes de temperatura.
Bomba	60.9	0.1	44.7	16.2	0.4% Fricción.
TOTAL	6,530.9	15.0	2,138.1	4,392.8	100%

El análisis anterior fue comparado con la configuración 8 de los ciclos combinados debido a que genera la misma cantidad de energía eléctrica aunque cabe recordar que dicha configuración posee una turbina de gas. Las propiedades de ésta configuración se aprecian en la Tabla 38.

Tabla 38. Propiedades de las corrientes de la configuración 8.

FLUJOS	TEMPERATURA [°C]	PRESIÓN [bar]	FLUJO		
			MÁSICO [kg/s]	ENTALPÍA [kJ/kg]	ENTROPÍA [kJ/kg K]
1	450.0	1.5000	42.93	443.05	0.7806
2	450.0	1.5000	42.93	443.05	0.7806
3	450.0	1.5000	85.86	443.05	0.7806
4	1,267.8	23.2600	85.86	1,398.55	0.8719
5	446.0	0.7752	85.86	438.75	0.9680
6	515.0	0.7454	85.99	516.02	1.0827
7	450.3	0.7429	85.99	444.90	0.9872
8	271.5	0.7379	85.99	253.58	0.6769
9	158.0	0.7354	85.99	135.75	0.4285
10	25.0	20.6800	0.13	50,046.70	9.0720
11	35	41.6200	10.94	149.72	0.5037
12	247	40.8000	10.94	1,068.80	2.7653
13	252	40.8000	9.41	2,799.80	6.0650
14	252	40.8000	1.53	1,093.07	2.8084
15	102	1.0690	0.45	2,678.17	7.3393
16	102	1.0690	1.08	425.36	1.3237

17	500	40.0000	9.41	3,444.77	7.0919
18	500	40.0000	0.70	3,444.77	7.0919
19	500	40.0000	8.71	3,444.77	7.0919
20	154	2.0000	0.70	2,776.60	7.3003
21	39	0.0689	8.71	2,350.02	7.5708
22	39	0.0689	0.05	162.19	0.5000
23	39	0.0689	0.19	162.19	0.5000
24	39	0.0689	8.95	2,290.98	7.3815
25	39	0.0689	8.95	162.19	0.5000
26	15	2.5290	456.70	63.82	0.2000
27	25	1.6320	456.70	105.55	0.3000
28	15	0.7354	456.70	63.58	0.2000
29	15	0.0689	1.99	62.94	0.2000
30	34	0.0689	10.94	144.15	0.4916
31	34	0.0689	10.94	144.15	0.4916

Las Tablas 39 y 40 muestran los resultados de exergía destruida de esta configuración. Se puede observar que el trabajo requerido por el compresor es prácticamente el mismo que el generado por la turbina de gas por lo que todo este proceso es prácticamente desperdiciado en su totalidad. Además se puede observar que la exergía destruida de la turbina y el compresor es de más del 45% de todo el ciclo. Este proceso tiene un trabajo perdido de 10.2 MW lo cual equivale a más del doble del de la configuración 3.

Tabla 39. Analisis de exergía destruida de los equipos que conforman la configuración 8.

Equipo	Corrientes		ΔH	ΔS	ΔEx	Text	Q	W
	Entrada	Salida	[kJ/s]	[kJ/s K]	[kJ/s]	[K]	[kJ/s]	[kJ/s]
Compresor	3	4	82,039.23	7.84	79,749.1			82,039.23
Turbina Gas	4	5	-82,408.43	8.25	-84,819.0			-82,408.43
Economizador	11	12	10,054.74	24.74	2,826.6	485.7	10,054.7	
Recalentador	12	14	16,331.44	31.13	7,237.2	629.8	16,331.4	
Sobrecalentador	13	17	6,070.46	9.67	3,246.8	755.3	6,070.5	
Turbina Vapor I	18	20	-467.72	0.15	-510.3			-467.7
Turbina Vapor II	19	21	-9,537.46	4.17	-10,756.4			-9,537.5
Condensador	24	25	-19,059.06	-61.61	-1,059.7	292.0	-19,059.1	
Bomba	31	11	60.94	0.13	22.1			60.9
TOTAL							13,397.6	-10,313.4

Tabla 40. Analisis de exergía destruida de los equipos que conforman la configuración 8 (continuación).

Equipo	Weq	Sgen	(Weq)min	Wp	Irreversibilidades
	[kJ/s]	[kJ/s K]	[kJ/s]	[kJ/s]	
Compresor	82,039.2	7.84	79,749.1	2,290.2	22.4%
Turbina Gas	82,408.4	8.25	-84,819.0	2,410.6	23.5%
Economizador	4,006.5	4.0	2,826.6	1,180.0	11.5% Transferencia de calor a través de

Recalentador	8,756.1	5.2	7,237.2	1,519.0	14.8%	gradientes de temperatura. Transferencia de calor a través de gradientes de temperatura.
Sobrecalentador	3,722.6	1.6	3,246.8	475.8	4.6%	Transferencia de calor a través de gradientes de temperatura.
Turbina Vapor I	-467.7	0.1	-510.3	42.6	0.4%	Expansión súbita.
Turbina Vapor II	-9,537.5	4.2	-10,756.4	1,218.9	11.9%	Expansión súbita.
Condensador	8.4	3.7	-1,059.7	1,068.1	10.4%	Transferencia de calor a través de gradientes de temperatura.
Bomba	60.9	0.1	22.1	38.8	0.4%	Fricción.
TOTAL	6,180.2	35.1	-4,063.6	10,243.8	100%	

Análisis exergoeconómico

Para llevar a cabo el análisis exergoeconómico de un proceso es necesario realizar la siguiente serie de pasos y cálculos de acuerdo con el método propuesto por Valero y Tsatsaronis [22]:

- I. Obtener el diagrama de proceso para estudiar de qué equipos y corrientes se compone. Ver ANEXO C1.
- II. Efectuar el balance de materia y energía para obtener las propiedades de todas las corrientes de proceso.
- III. Realizar el cálculo de la exergía de las corrientes de proceso.
- IV. Obtener la matriz de incidencia del proceso.
- V. Plantear las proposiciones apropiadas para completar la matriz de incidencia.
- VI. Obtener el vector de costo de los equipos.
- VII. Efectuar el cálculo exergoeconómico.

De la simulación se obtuvieron las propiedades de las corrientes como temperatura, presión, flujo másico y entalpías. Las entropías fueron calculadas mediante tablas para el caso de agua y mediante la siguiente ecuación para las corrientes de gases de combustión.

$$S - S_0 = \sum_{i=1}^n N_i (\Delta S_i)_f + \sum_{i=1}^n N_i \int_{T_0}^T \frac{Cp_i}{T} dT - N_T R \ln \frac{P}{P_0}$$

Las constantes de capacidad calorífica y el polinomio fueron tomados del Instituto Nacional de Tecnología y Estándares (NIST) [29].

Una vez calculadas las propiedades, se obtuvieron las exergías de cada corriente de acuerdo con la siguiente ecuación [23]:

$$b = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$$

Donde los términos $(h - h_0)$ y $(s - s_0)$ son las variaciones de entalpía y entropía por unidad de masa de P_0 y T_0 a T y P considerando que la composición de la mezcla permanece constante.

En la Tabla 41 se muestran las propiedades de las corrientes y el cálculo de sus exergías.

Tabla 41. Propiedades de las corrientes de la configuración 3 para el análisis exergoeconómico.

FLUJOS	TEMPERATURA [°C]	PRESIÓN [bar]	FLUJO MÁSSICO [kg/s]	ENTALPÍA [kJ/kg]	ENTROPÍA [kJ/kg K]	EXERGÍA [kJ/kg]	ENERGÍA [kW]	EXERGÍA [kW]	
Gases combustión	1	450.0	0.7752	42.93	442.70	0.974	158.09	19,005	6,787
	2	450.0	0.7752	42.93	442.70	0.974	158.09	19,005	6,787
	3	450.0	0.7752	85.86	442.70	0.974	158.09	38,010	13,573
	4	515.0	0.7454	85.99	515.47	1.083	199.16	44,325	17,126
	5	450.3	0.7429	85.99	444.43	0.987	156.02	38,217	13,416
	6	271.5	0.7379	85.99	253.32	0.677	55.56	21,783	4,778
	7	158.0	0.7354	85.99	135.59	0.429	10.40	11,659	895
CH ₄	8	25.0	20.6800	0.13	50,047	9.072	47,396.32	6,356	6,019
Agua	9	34.9	41.6200	10.93	149.70	0.50237	5.54	1,636	61
	10	246.5	40.8000	10.93	1068.80	2.76062	264.89	11,682	2,895
	11	251.5	40.8000	1.53	1093.07	2.80708	275.59	1,672	422
	14	251.5	40.8000	9.40	2799.80	6.06010	1,031.95	26,321	9,701
	15	500.0	40.0000	9.40	3444.77	7.09190	1,375.48	32,384	12,931
	16	154.0	2.0000	9.40	2776.33	7.29954	646.38	26,100	6,077
	17	154.0	2.0000	0.70	2776.63	7.30032	646.45	1,944	453
	18	154.0	2.0000	8.70	2776.63	7.30032	646.45	24,157	5,624
	19	38.7	0.0689	8.70	2348.71	7.56660	140.74	20,434	1,224
	20			0.00				1,830	0.00
	21	38.72	1.0135	0.46	162.19	0.55530	2.57	74.28	1.18
	23	38.7	0.0689	0.24	162.19	0.55530	2.57	39.25	0.62
	25	38.7	0.0689	8.94	2289.54	7.37690	136.99	20,473	1,225
	29	38.7	0.0689	8.94	162.17	0.55505	2.62	1,450	23.47
	30	15.0	0.0689	1.99	62.94	0.22460	-0.068	125	-0.135
	31	34.4	0.0689	10.93	144.13	0.49730	1.45	1,575	15.88
	33			0.00				6,284	6,284
	34			0.00				3,723	3,723
	35			0.00				60.88	60.88
	36			0.00				40.89	0.00
37			0.00				45.37	0.00	
38			0.00				122.22	0.00	
39			0.00				77.84	0.00	
40			0				19,023	0.00	

Posteriormente se obtiene la matriz de incidencia a partir del diagrama de proceso para indicar los equipos que forman parte del ciclo, sus corrientes de entrada y de salida.

Matriz 1. Matriz de incidencia.

		MATRIZ DE INCIDENCIA																																										
		FLUJOS																																										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	14	15	16	17	18	19	20	21	23	25	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	40											
EQUIPOS	1	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
	2	0	0	1	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0		
	3	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	
	4	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	
	5	0	0	0	0	0	1	-1	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

El siguiente paso es corroborar que los balances de materia, energía y exergía son correctos mediante la multiplicación de la matriz de incidencia y los vectores de materia, energía y exergía.

Tabla 42. Tabla de resultados de los balances de materia, energía y exergía.

EQUIPO	ENTRA	SALE	MATERIA	ENERGÍA	EXERGÍA
1 MEZCLADOR GASES	1 Y 2	3	0.00	0.00	0.00
2 COMBUSTOR	3 Y 8	4	0.00	0.00	2,467.02
3 SOBRECA	4 Y 14	5 Y 15	0.00	0.00	480.06
4 EVAPORADOR	5 y 10	6, 11, 14 y 38	0.00	0.00	1,410.47
5 ECONOMIZADOR	6 y 9	7, 10 y 39	0.00	0.00	1,048.58
7 BOMBA	31 y 35	9	0.00	0.00	16.19
9 MEZCLADOR	29 Y 30	31	0.00	0.00	7.45
10 CONDENSADOR	25	29 y 40	0.00	0.00	1,201.48
13 MEZCLADOR	19 y 23	25	0.00	0.00	0.13
14 PROCESO	17	23, 20 y 21	0.00	0.00	450.72
15 TURBINA 1	15	16 y 33	0.00	0.00	570.30
16 SEPARADOR	16	17 y 18	0.00	0.00	0.00
17 TURBINA 2	18	19 y 34	0.00	0.00	676.81

Para el caso de los balances de materia y energía por equipos se deben obtener los vectores de conservación de energía, es decir, deben ser cero. El vector de exergía muestra la cantidad de exergía destruida por cada uno de los equipos a causa de sus irreversibilidades internas. En la Tabla 42 se observa que el combustor, la caldera y el

condensador son los equipos que destruyen más exergía, lo cual coincide con los resultados obtenidos del análisis de trabajo perdido efectuado anteriormente.

Debido a que una matriz de incidencia nunca es cuadrada, se deben plantear más ecuaciones para poder obtener la matriz inversa y de este modo calcular el vector de costo exergético y exergoeconómico.

De acuerdo con Valero et. al. [22] las proposiciones para completar la matriz de incidencia se deben plantear bajo los siguientes criterios:

- Proposición 1. El costo exergético es una propiedad conservativa.
- Proposición 2. Para las componentes multiplete del recurso total de un subsistema el costo exergético unitario de los flujos de salida debe ser igual al de los flujos de entrada.
- Proposición 3a. Si un subsistema tiene un producto total formado por varias componentes entonces todas ellas tendrán el mismo coste exergético unitario.
- Proposición 3b. Si una componente del producto tiene varios flujos de salida se les asignará a todos ellos el mismo coste exergético unitario.
- Proposición 4. En ausencia de valoración externa a los flujos de pérdidas debe asignárseles un coste exergético nulo ya que no tienen utilidad posterior.
- Proposición 5. En ausencia de valoración externa, el coste exergético de los flujos de entrada al sistema es igual a su exergía.

Utilizando las reglas anteriores se procede a plantear las ecuaciones que generen la matriz completada del sistema. Ver ANEXO C2.

Con la matriz completada y el vector de costo de los equipos se obtienen los resultados de la Tabla 44.

Tabla 43. Vector de costo de equipos.

	EQUIPO	[USD]	Z [USD/s]
1	MEZCLADOR GASES	57,000	0.00181
2	COMBUSTOR	400,000	0.01268
3	SOBRECA	33,000	0.00105

4	EVAPORADOR	33,000	0.00105
5	ECONOMIZADOR	33,000	0.00105
7	BOMBA	57,000	0.00181
9	MEZCLADOR	57,000	0.00181
10	CONDENSADOR	100,000	0.00317
13	MEZCLADOR	57,000	0.00181
14	PROCESO	57,000	0.00181
15	TURBINA 1	1,000,000	0.03171
16	SEPARADOR	57,000	0.00181
17	TURBINA 2	1,000,000	0.03171

Tabla 44. Tabla de exergía, costos exergéticos y exergoeconómicos de cada una de las corrientes de proceso.

	FLUJOS	EXERGÍA [kW]	B* [kW]	K*	Π [USD/kWh]	
Gases combustión	1	6,787	6,787	1	0.00	
	2	6,787	6,787	1	0.00	
	3	13,573	13,573	1	146.74	
	4	17,126	19,593	1	116.14	
	5	13,416	15,349	1	116.14	
	6	4,778	100,327	21	4,451.88	
	7	895	0	0	0.00	
	CH4	8	6,019	6,019	1	0.00
		9	61	2,144	35	4,486.17
		10	2,895	102,470	35	4,486.17
11		422	-1.4.E-12	0	747.64	
14		9,701	17,492	2	1,045.03	
15		12,931	21,736	2	1,021.94	
16		6,077	10,215	2	1,021.94	
17		453	761	2	1,216.93	
18		5,624	9,454	2	1,216.93	
19		1,224	2,058	2	1,216.93	
Agua	20	0.00	759.62	-	3,838.97	
	21	1.18	0.00	0	0.00	
	23	0.62	1.04	2	1,216.93	
	25	1,225	2,059	2	2,184.12	
	29	23.47	2,059.30	88	2,735.43	
	30	-0.135	23.466	-173	6.54	
	31	15.88	2,082.77	131	3,660.98	
	33	6,284	11,522	2	1,031.79	
	34	3,723	7,396	2	1,232.28	
	35	60.88	60.88	1	0.97	
	36	0.00	0.00	-	0.00	
37	0.00	0.00	-	0.00		
38	0.00	0.00	-	0.00		
39	0.00	0.00	-	0.00		
40	0.00	0.00	-	0.00		

El costo exergoeconómico de los flujos de un proceso industrial que intercambia energía está definido por la suma de dos contribuciones: la primera procede del costo monetario de la exergía de entrada a la planta necesaria para producir dicho flujo, que

es por definición su costo exergético y la segunda que engloba el resto de los costos originados en el proceso productivo asociado a su obtención (capital, operación, mantenimiento, etc.)

En la Tabla 44 se puede observar que los costos exergoeconómicos de los flujos tanto de entrada como de salida al proceso son prácticamente cero, lo que indica que la contribución al costo por parte del costo de los equipos y materia prima tiene muy poca contribución.

Por otra parte, la obtención de energía de las turbinas tiene un costo promedio de 3,000 USD/s; sin embargo, la corriente 35 es poco significativa.

Las corrientes a las que se les asocia un costo exergoeconómico mayor son las corrientes del ciclo de vapor que se intercambian en la caldera y las que participan en el condensador, lo cual resulta lógico debido a que estos equipos son los que mayores irreversibilidades internas poseen debido a las diferencias de temperaturas como se había notado en el análisis de trabajo perdido realizado anteriormente.

Análisis costo- beneficio

Una vez que se ha seleccionado la configuración 3 como la mejor opción, es necesario llevar a cabo un análisis de costo- beneficio para determinar su factibilidad en tiempo y dinero.

Es importante mencionar que la capacidad instalada del proceso de estudio es de 5 MWe; sin embargo, la misma compañía posee otras instalaciones que operan en otro estado de la República Mexicana y el excedente de energía eléctrica puede ser utilizado para satisfacer sus necesidades energéticas también, por lo tanto ambas pueden beneficiarse de la nueva planta de cogeneración y los beneficios económicos serán aún mayores.

De acuerdo con un análisis realizado por el Departamento de Energía de Estados Unidos [16] el costo de generación de 1MWe por un sistema de turbinas de vapor de GE es del 1,000 USD. El resto de los costos de la instalación de una planta de este tipo son basados en este precio como se muestra en la Tabla 45.

Tabla 45. Cálculo del tiempo de recuperación de la inversión.

Equipo	Costo por kWe generado	kWe	Costo de equipos [USD]
Turbina + Generador	\$ 1,000	9,000	\$ 9,000,000
Recuperador de calor			6% \$ 540,000
Sistema de control			106% \$ 9,540,000
Ingeniería			15% \$ 1,350,000
Instalación			15% \$ 1,350,000
Otros costos			\$ 50,000
TOTAL			\$ 21,830,000
AHORROS			
Energía eléctrica (planta 1)			\$ 3,784,615.38
Energía eléctrica (planta 2)			\$ 2,769,230.77
TOTAL			\$ 6,553,846.15
Tiempo de recuperación (años)			3.33

Con este análisis se obtiene un tiempo de recuperación del proyecto de 3 años 4 meses considerando que se evitarían todos los costos de energía eléctrica en ambas plantas.

A manera de obtener otro marco de referencia se consultó un artículo de aproximación de costo de equipos emitido por el Departamento de Energía de Estados Unidos [21] y se volvió a estimar el costo del proyecto. En la Tabla 46 se pueden observar los costos asociados a cada uno de los equipos y a su respectiva instalación.

Sorpresivamente los resultados arrojan un costo del proyecto mucho menor por lo que el tiempo de recuperación disminuye a menos de 6 meses.

A manera de conclusión se puede decir que el proyecto es rentable sin importar el costo de implementación que se considere ya que con ambas referencias se obtuvieron resultados viables y se debe recordar que en los estudios realizados a otras plantas de este estilo arrojaron resultados muy similares en cuando a factibilidad.

Tabla 46. Costo de equipos y ahorros asociados al proyecto.

EQUIPO	COSTOS [USD]
Turbina de vapor	\$ 1,000,000.00
Condensador	\$ 100,000.00



Caldera	\$	100,000.00
Torre de enfriamiento	\$	100,000.00
Combustor	\$	400,000.00
Tubería e instrumentación	\$	340,000.00
Instalación	\$	340,000.00
Ingeniería	\$	340,000.00
Otros costos	\$	100,000.00
TOTAL	\$	2,820,000.00

AHORROS

Energía eléctrica (planta 1)	\$	3,784,615.38
Energía eléctrica (planta 2)	\$	2,769,230.77
TOTAL	\$	6,553,846.15

Tiempo de recuperación (años)	0.43
--------------------------------------	-------------



Capítulo V

Conclusiones



CONCLUSIONES

- Actualmente los procesos industriales en México necesitan urgentemente llevar a cabo un análisis energético que ayude a mejorar sus rendimientos económicos para ser más competitivos en el mercado actual.
- Los altos requerimientos ambientales que el mundo enfrenta hoy en día han llevado a una seria disminución de utilidades de muchos procesos industriales ya que cada vez resulta más difícil obtener los mismos productos a menor costo.
- La energía es un recurso que mueve cualquier proceso en la actualidad y es urgente que se lleven a cabo análisis que proporcionen mejoras y ahorros a nivel industrial ya que dichos procesos son los mayores consumidores de este recurso en nuestro país.
- La industria de fundición es un proceso particularmente interesante para la eficiencia energética ya que es de los que mayores requerimientos de energía tiene y los beneficios pueden resultar muy factibles.
- En cualquier proceso de fundición se poseen equipos como hornos de tratamiento térmico, de fundido de metal y de precalentamiento de moldes que operan con eficiencias muy bajas o bien, sus efluentes de energía son de alta calidad, generando gases de combustión de alto flujo y temperatura de los cuales se puede recuperar energía para ser enviada a otros puntos del proceso incluso para generar vapor y satisfacer las necesidades de energía térmica que la planta requiera.
- La implementación de una planta de cogeneración es una excelente oportunidad de ahorro de energía en los procesos industriales ya que con los efluentes desperdiciados se pueden satisfacer en su totalidad los requerimientos de energía eléctrica de una planta que opera con un proceso de fundición basado en la energía eléctrica; pero además, el sobrante de energía puede ser enviado a otras plantas de la misma compañía para incrementar los ahorros económicos y disminuir el tiempo de recuperación de la inversión.

- Los diseños más sencillos de plantas de cogeneración logran satisfacer las necesidades tanto térmicas como eléctricas de la planta con eficiencias de ciclo que caen dentro del rango común de 20 a 40%.
- A una industria mediana como la que se analiza con requerimientos pequeños de 5MWe le conviene implementar una planta de cogeneración sencilla, con la menor cantidad de equipos posible por cuestiones de espacio y de tiempo de recuperación del proyecto. Una planta de este tipo ayudará a producir los mismos productos pero generando mayores utilidades y beneficios económicos para la compañía además de contribuir a la disminución de efluentes contaminantes a la atmósfera.
- Los análisis de exergía destruida y exergoeconómico muestran que a pesar de que las configuraciones resultan muy eficientes debido a que se está recuperando energía desperdiciada, aún se tienen las irreversibilidades comunes de cualquier ciclo que provocan pérdidas de energía como los condensadores, calderas y mezcladores. Aún se puede trabajar en este tipo de detalles para volver el ciclo aún más eficiente.
- El tiempo de recuperación de la implementación de una planta de cogeneración es muy bajo ya que varía desde 6 meses hasta 3 años, haciendo de este tipo de proyectos extremadamente factibles de implementar.

Como trabajo a futuro se propone, además de realizar estudios a otro tipo de industrias, la revisión, optimización y adecuado mantenimiento de los otros sistemas consumidores de energía como el sistema de compresión de aire y bombeo, sistema eléctrico y eficiencias de equipos como hornos y máquinas de acabado.

ARTÍCULOS Y LIBROS

- [1] SENER, Balance Nacional de Energía 2011. Subsecretaría de Planeación energética y desarrollo tecnológico, México, 2012.
- [2] Industrial Technologies Program (ITP), Metal casting industry of the future fiscal year 2004 annual report. U.S. Department of Energy, 2004.
- [3] Industrial Technologies Program (ITP), Advanced Melting Technologies: Energy saving concepts and opportunities for the metal casting industry. U.S. Department of energy, November 2005.
- [4] Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, Aluminium IOF, In-Situ, Real- Time Measurement of Melt Constituents. 2004.
- [5] J.F. Schifo, J.T. Radia, Theoretical/Best practice energy use in metalcasting operations. U.S. Department of energy, May 2004.
- [6] J.H. Mortimer, Batch Induction Melting, Inductotherm, Rancocas, NJ, 2001.
- [7] M.T. Eckert, How your Induction Melt Shop can survive the Power Crisis, Inductotherm, Rancocas, NJ, 2001.
- [8] Technology of Metalcasting, Melt furnaces. P 113.
- [9] Kent D. Peaslee, Simon Lekakh, Bradley Randall, Thermal efficiency of Steel melting. 58th T&O Conf Proceedings, SFSA, 2004.
- [10] Energetics Incorporated, Energy and Environmental profile of the US Metalcasting Industry, September 1999.
- [11] Department of Energy, Metalcasting Multi Year Program Plan, p. 1.
- [12] AIE, CO₂ Emissions from Fuel Combustion, Edición 2010.
- [13] Plant- Wide Assessment Summary Metal Casting, \$3.6 million in savings identified in AMCAST Assessment, September 2003.
- [14] Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, Metlab Plant- Wide Assessment, August 2002.

- [15] Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, Compressed air system improvement project saves foundry energy and increases production, May 2002.
- [16] Pruszko Rudy, Crandall Clay, An assessment of energy, waste and productivity improvements for North Star Steel Iowa, U. S. Department of Energy, April 2003.
- [17] CADDET, Sittard, Process heating in the metals industry, Analysis series No. 11, Netherlands, October 1993.
- [18] Yunes A Cengel, Michael A. Boles, Termodinámica, Séptima Edición, 2012.
- [19] Eppich Robert, D. Naranjo Robert, Implementation of metalcasting best practices. U. S. Department of energy, Jan 2007.
- [20] E. Eppich Robert, Energy use in selected metalcasting facilities-2003. U.S. Department of energy, May 2004.
- [21] H.P. Loh U.S. Department of energy, Process equipment cost estimation final report, January 2002.
- [22] Valero Antonio, Lozano Miguel Ángel, Curso de termoeconomía, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, Julio 1994.
- [23] Miguel Ángel Lozano, Antonio Valero, Determinacion de la exergía para sustancias de interés industrial, Departamento de termodinámica y fisicoquímica, Universidad de Zaragoza.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Comisión Federal de Electricidad
Dirección General, Subdirección de Programación.
Subdirección de Energéticos y Seguridad.

- [24] <http://www.cfe.gob.mx>

Comisión Reguladora de Energía
Informe de precios diferenciados.
Informe Estadístico de Operación Eléctrica de Permisos de
Autoabastecimiento, Cogeneración y Pequeña Producción.

- [25] <http://www.cre.gob.mx>



Instituto Nacional de Estadística y Geografía
Encuesta Industrial Mensual (EIM).
Encuesta Mensual sobre Establecimientos Comerciales (EMEC).
Estadísticas del Comercio Exterior de México.
Estadística Mensual de la Industria Minero metalúrgica (EMIMM).
Sistema de Cuentas Nacionales de México.
II. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.
[26] <http://www.inegi.org.mx>

Secretaría de Energía
Encuesta sobre el Consumo de Energía en el Sector Industrial 2011.
Reporte mensual de Productores Independientes de Energía Eléctrica
2011.
Sistema de Información Energética (SIE). Quinto Informe de Labores.
[27] <http://sie.energia.gob.mx>

Petróleos Mexicanos
Anuario Estadístico de PEMEX, México, 2010.
BDI. Base de Datos Institucional. PEMEX Corporativo.
Dirección Corporativa de Finanzas, Subdirección de Planeación
Económica.
Indicadores petroleros.
Memoria de Labores 2010, PEMEX, México, 2011.
[28] <http://www.pemex.com>

National Institute of Standards and Technology (NIST)
[29] www.nist.gov



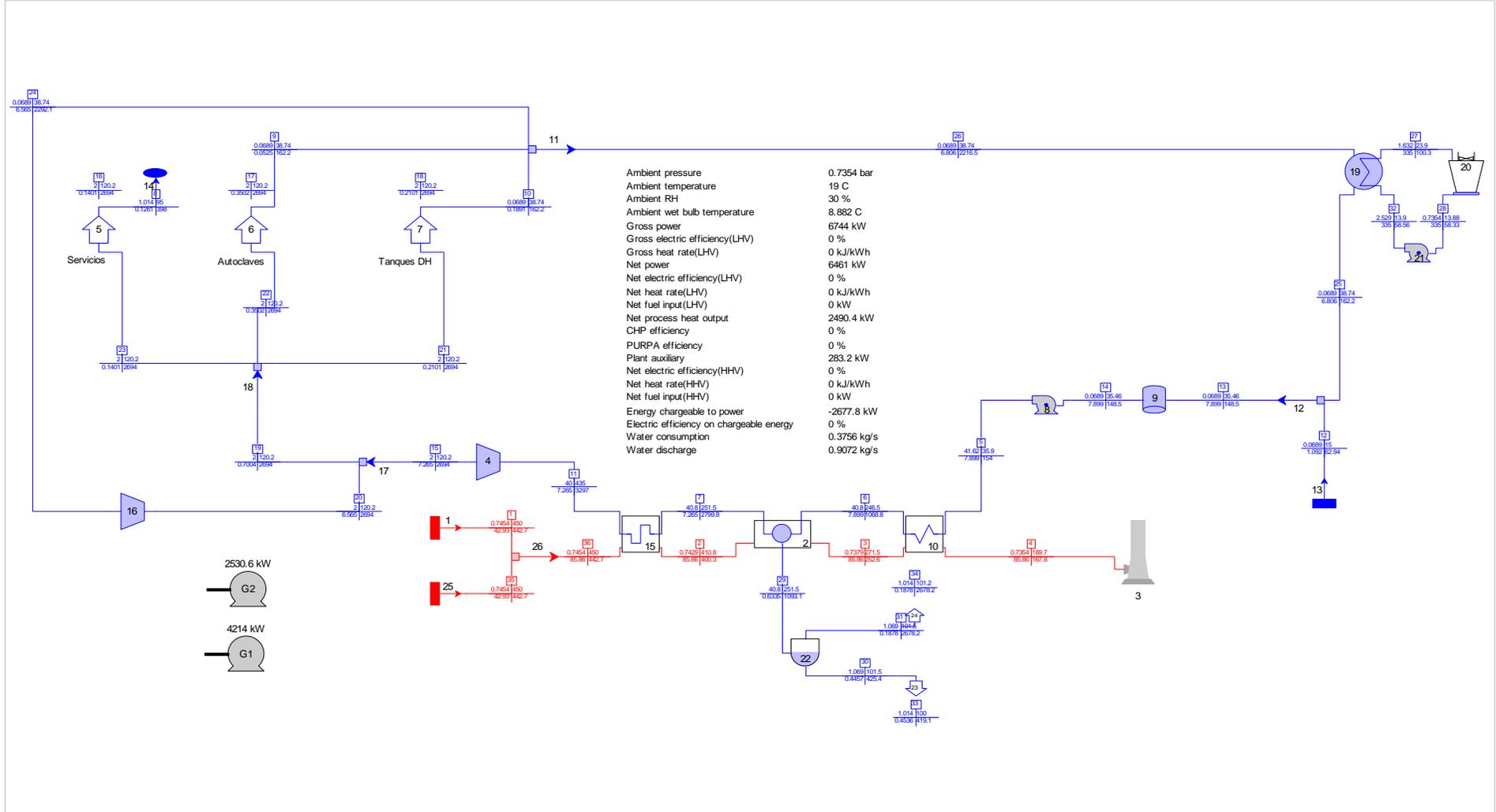


ANEXOS

ANEXO A1. Diagrama de proceso de la configuración 1 obtenido de THERMOFLEX.

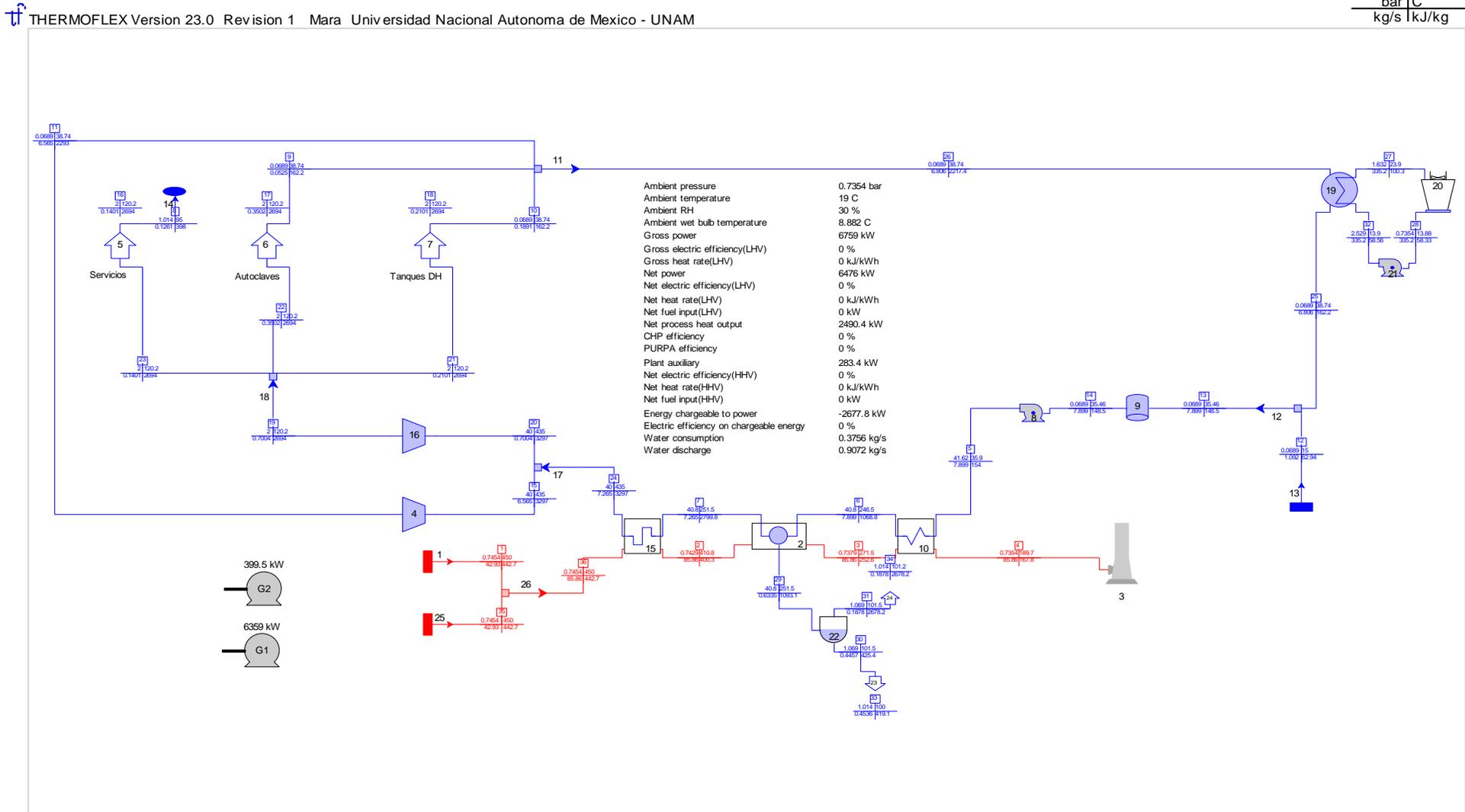
THERMOFLEX Version 23.0 Revision 1 Mara Universidad Nacional Autonoma de Mexico - UNAM

bar | C
kg/s | kJ/kg





ANEXO A2. Diagrama de proceso de la configuración 2 obtenido de THERMOFLEX.



0 File = C:\USERS\MARA\DOCUMENTS\MAESTRÍA\TESIS\SIMULACIONES TERMOFLEX\DEFINITIVAS\CONFIGURACIÓN 2.TFX 01-15-2014 09:57:49

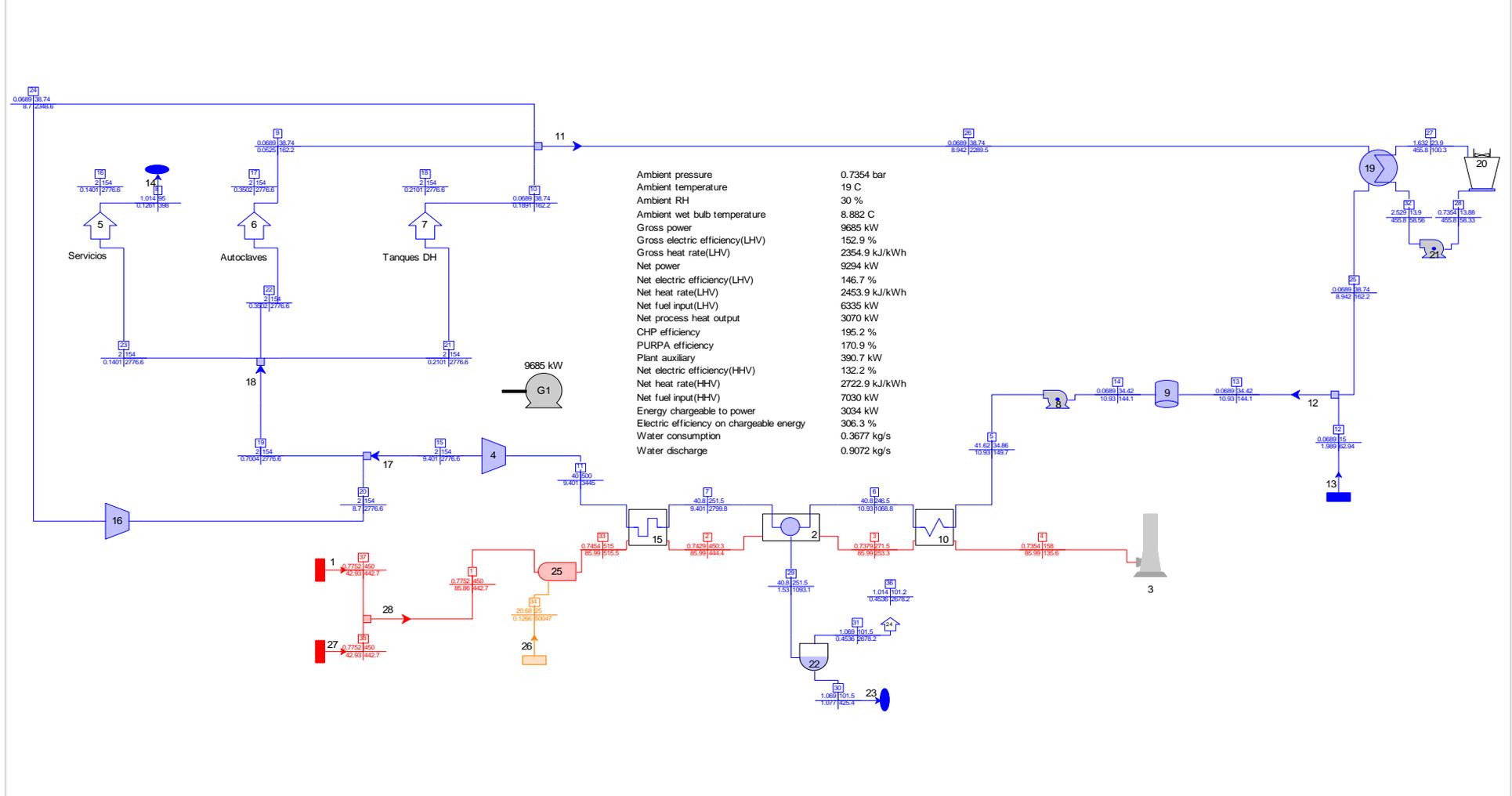
Sheet 1



ANEXO A3. Diagrama de proceso de la configuración 3 obtenido de THERMOFLEX.

THERMOFLEX Version 23.0 Revision 1 Mara Universidad Nacional Autonoma de Mexico - UNAM

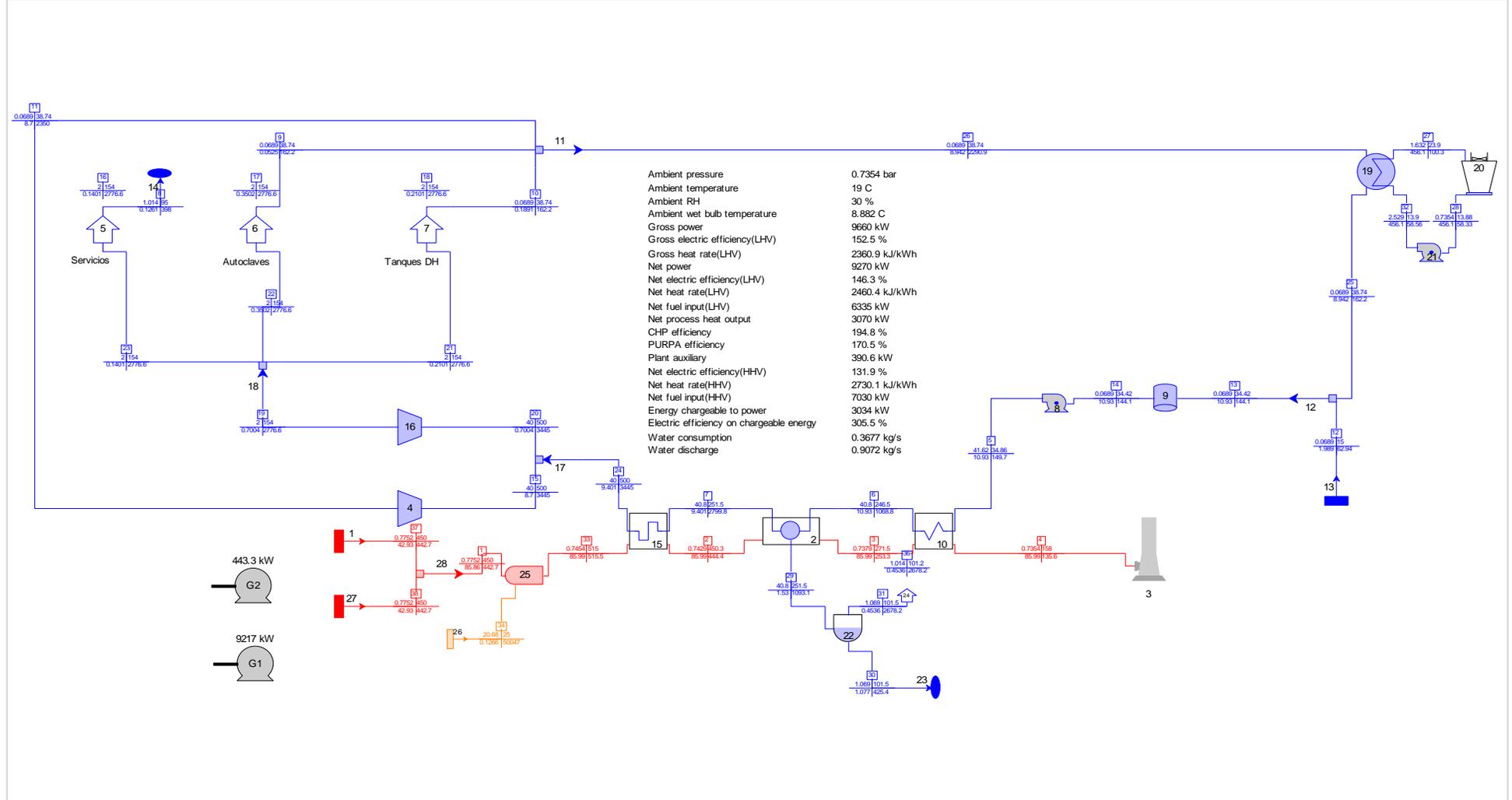
bar | C
kg/s | kJ/kg



ANEXO A4. Diagrama de proceso de la configuración 4 obtenido de THERMOFLEX.

THERMOFLEX Version 23.0 Revision 1 Mara Universidad Nacional Autonoma de Mexico - UNAM

bar | C
kg/s | kJ/kg

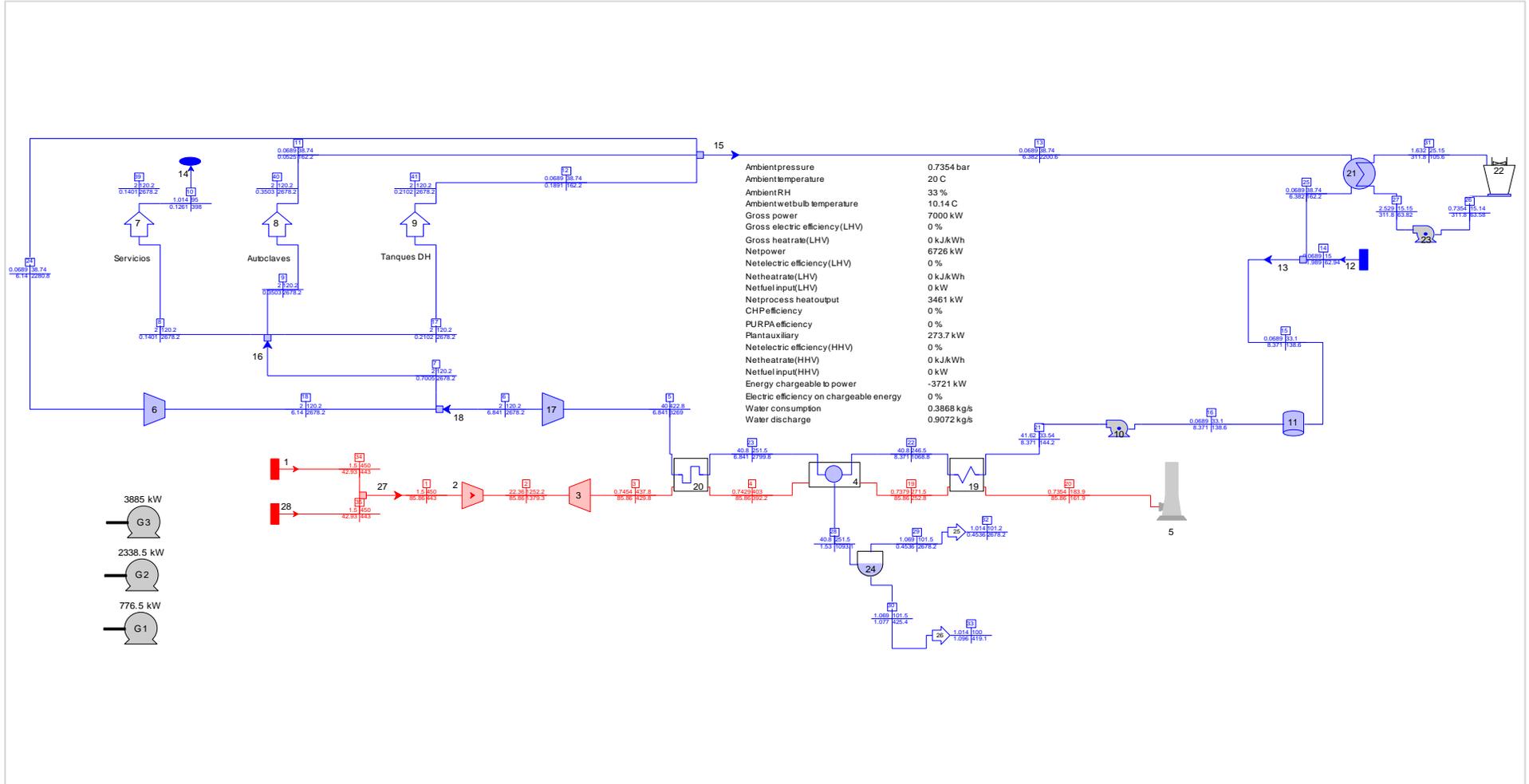




ANEXO A5. Diagrama de proceso de la configuración 5 obtenido de THERMOFLEX.

THERMOFLEX Version 23.0 Revision 1 Mara Universidad Nacional Autonoma de Mexico - UNAM

bar | C
kg/s | kJ/kg



0 File = C:\USERS\MARA\DOCUMENTS\MAESTRÍA\TESIS\SIMULACIONES TERMOFLEX\DEFINITIVAS\CONFIGURACIÓN 5.TFX 01-15-2014 09:58:07

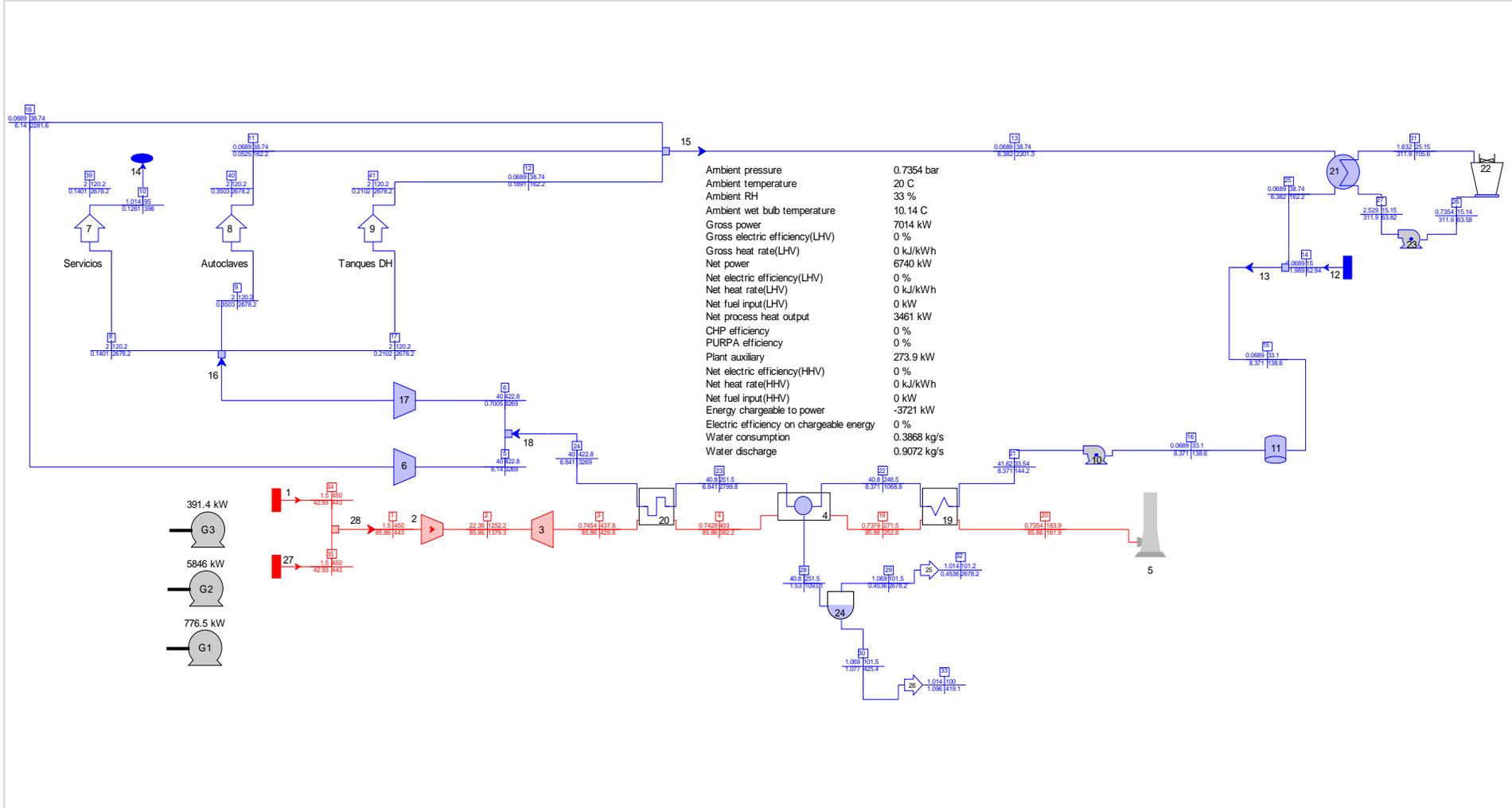
Combinado



ANEXO A6. Diagrama de proceso de la configuración 6 obtenido de THERMOFLEX.

THERMOFLEX Version 23.0 Revision 1 Mara Universidad Nacional Autonoma de Mexico - UNAM

bar | C
kg/s | kJ/kg

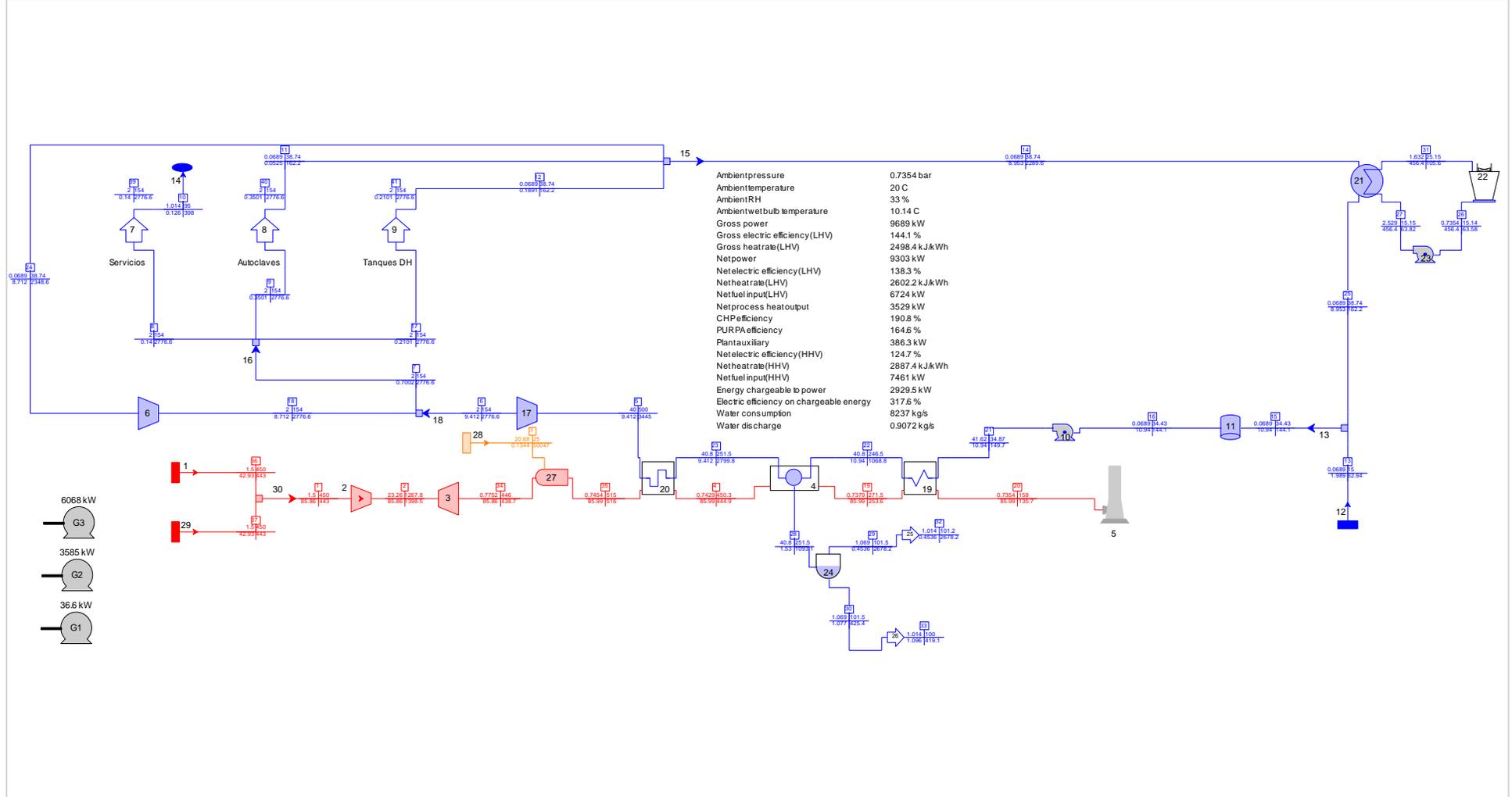


0 File = C:\USERS\MARA\DOCUMENTS\MAESTRÍA\TESIS\SIMULACIONES TERMOFLEX\DEFINITIVAS\CONFIGURACIÓN 6.TFX 01-15-2014 09:58:18

Combinado

ANEXO A7. Diagrama de proceso de la configuración 7 obtenido de THERMOFLEX.

THERMOFLEX Version 23.0 Revision 1 Mara Universidad Nacional Autonoma de Mexico - UNAM

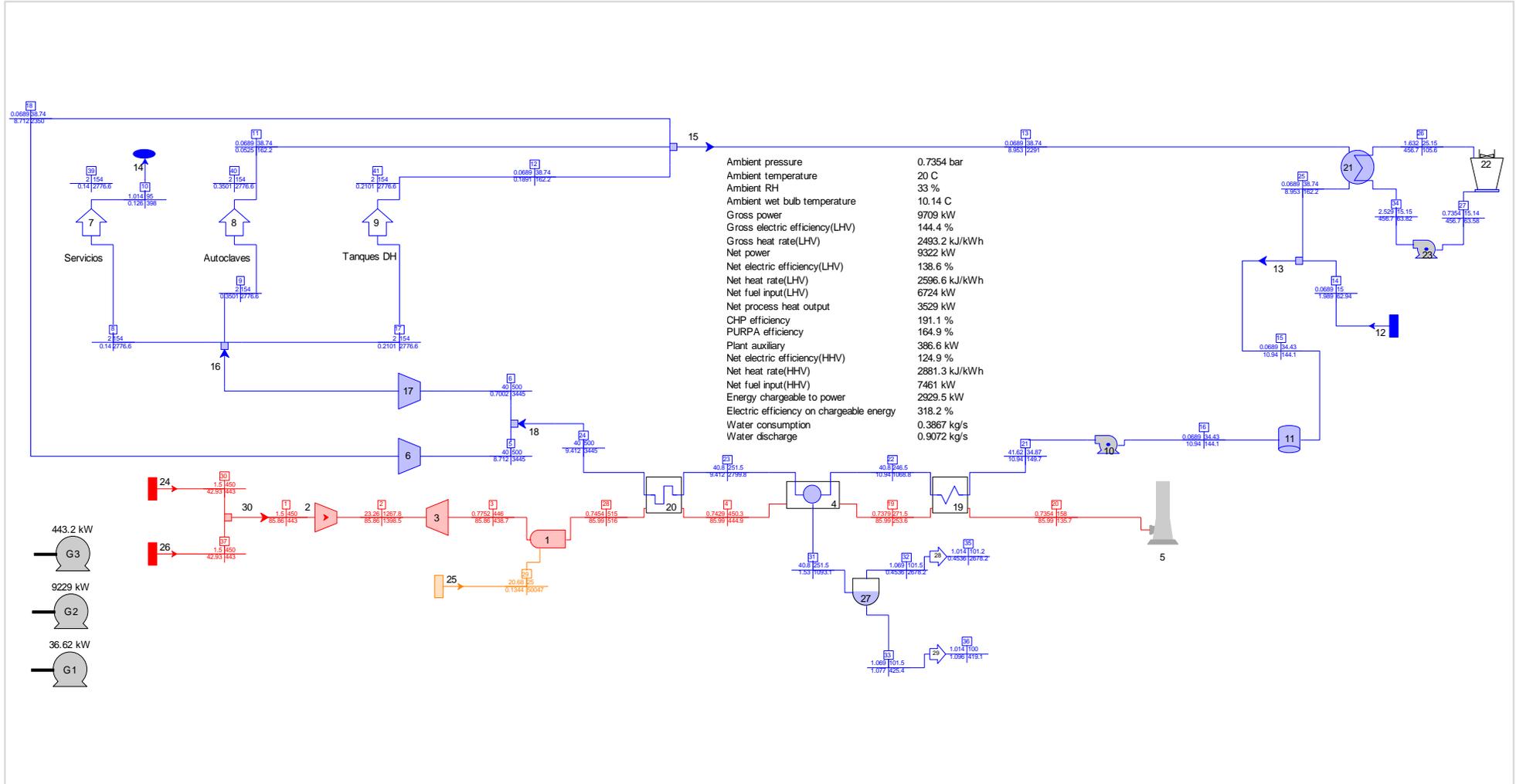
bar | C
kg/s | kJ/kg

0 File = C:\USERS\MARA\DOCUMENTS\MAESTRÍA\TESIS\SIMULACIONES TERMOFLEX\DEFINITIVAS\CONFIGURACIÓN 7.TFX 01-15-2014 09:58:23

Combinado

ANEXO A8. Diagrama de proceso de la configuración 8 obtenido de THERMOFLEX.

THERMOFLEX Version 23.0 Revision 1 Mara Universidad Nacional Autonoma de Mexico - UNAM



0 File = C:\USERS\MARA\DOCUMENTS\MAESTRÍA\TESIS\SIMULACIONES THERMOFLEX\DEFINITIVAS\CONFIGURACIÓN 8.TFX 01-15-2014 09:58:32

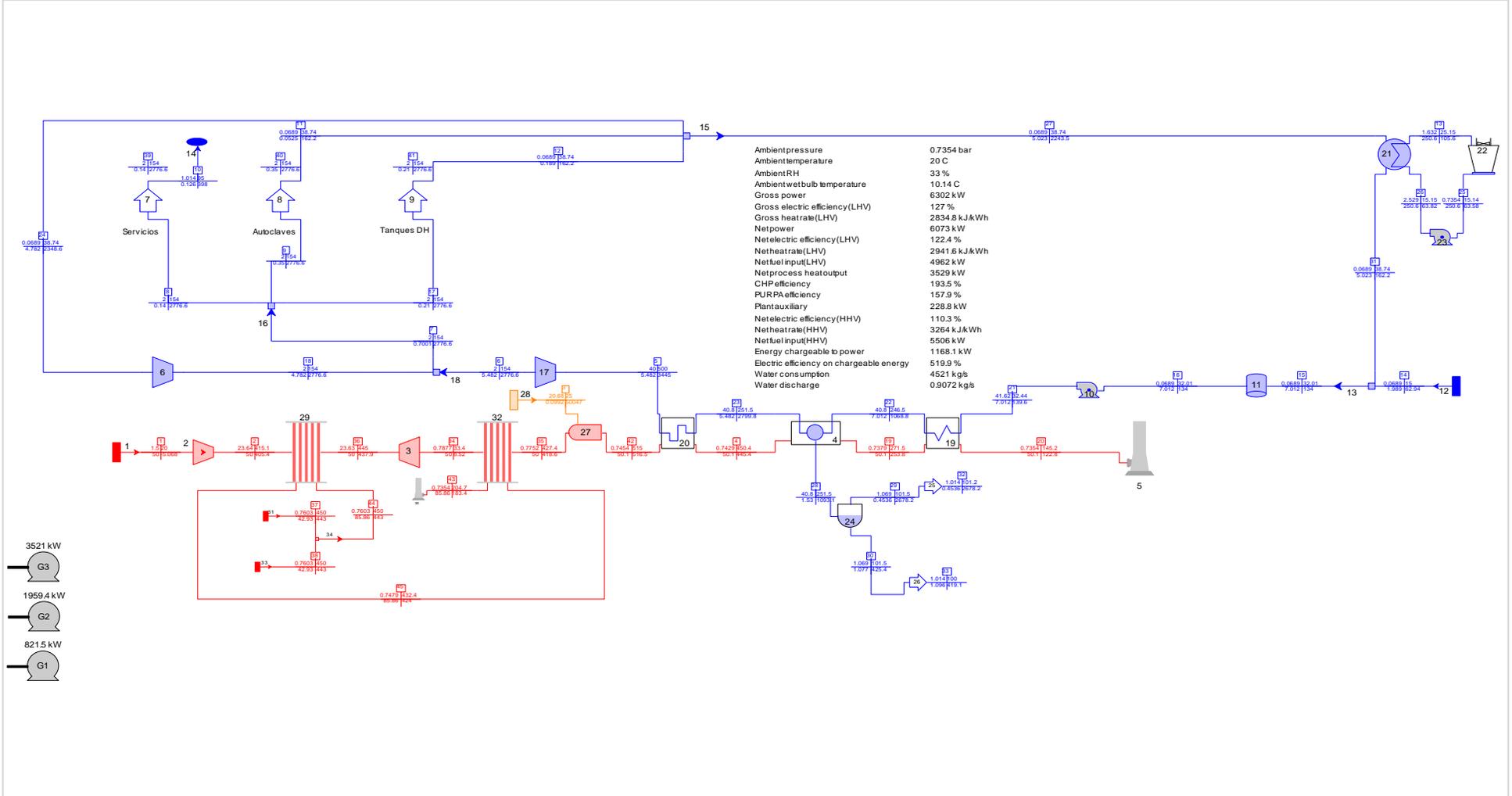
Combinado



ANEXO A9. Diagrama de proceso de la configuración 9 obtenido de THERMOFLEX.

THERMOFLEX Version 23.0 Revision 1 Mara Universidad Nacional Autonoma de Mexico - UNAM

bar | C
kg/s | kJ/kg



0 File = C:\USERS\MARA\DOCUMENTS\MAESTRÍA\TESIS\SIMULACIONES TERMOFLEX\DEFINITIVAS\CONFIGURACIÓN 9.TFX 01-15-2014 09:58:40

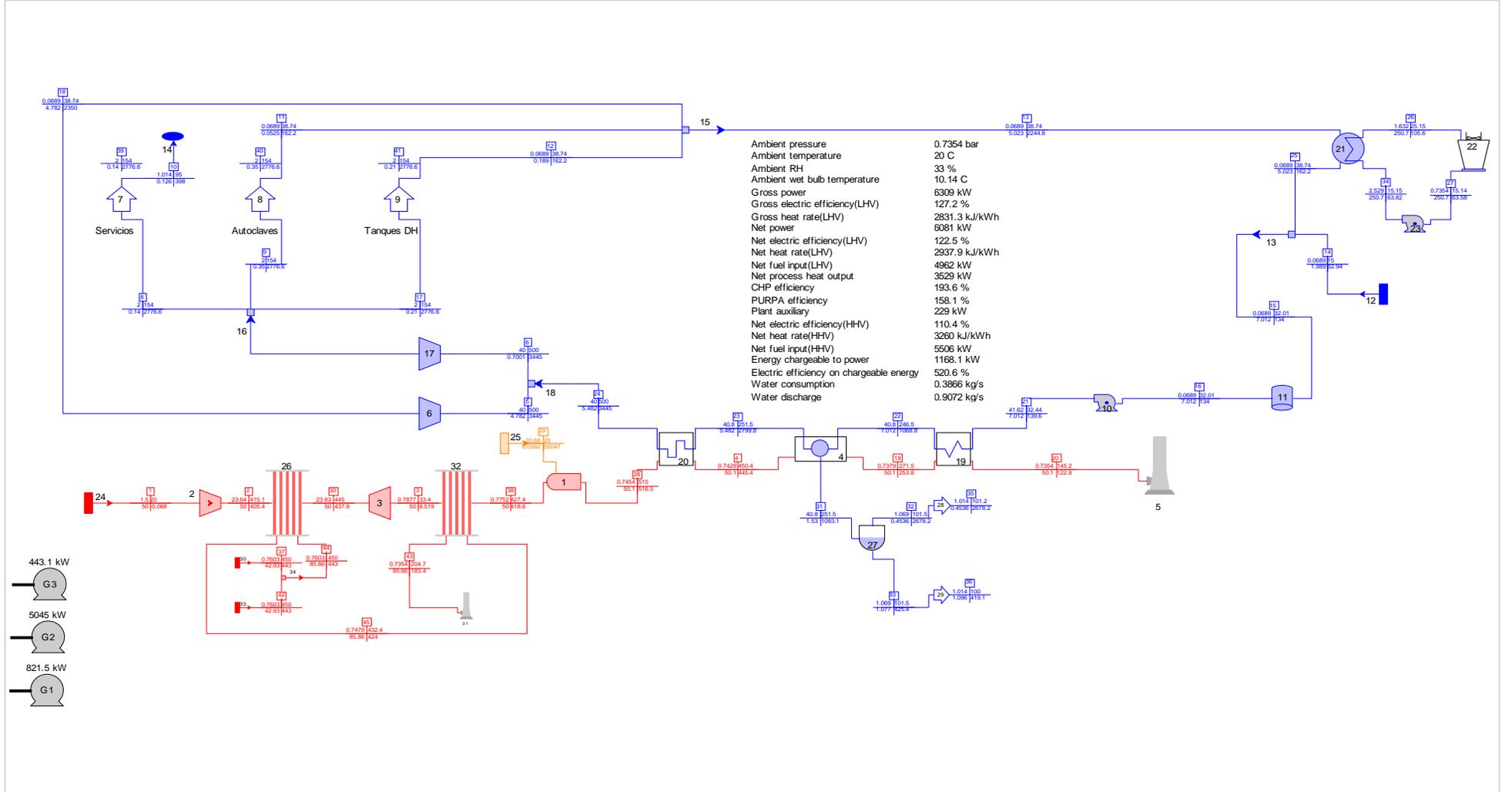
Combinado



ANEXO A10. Diagrama de proceso de la configuración 10 obtenido de THERMOFLEX.

THERMOFLEX Version 23.0 Revision 1 Mara Universidad Nacional Autonoma de Mexico - UNAM

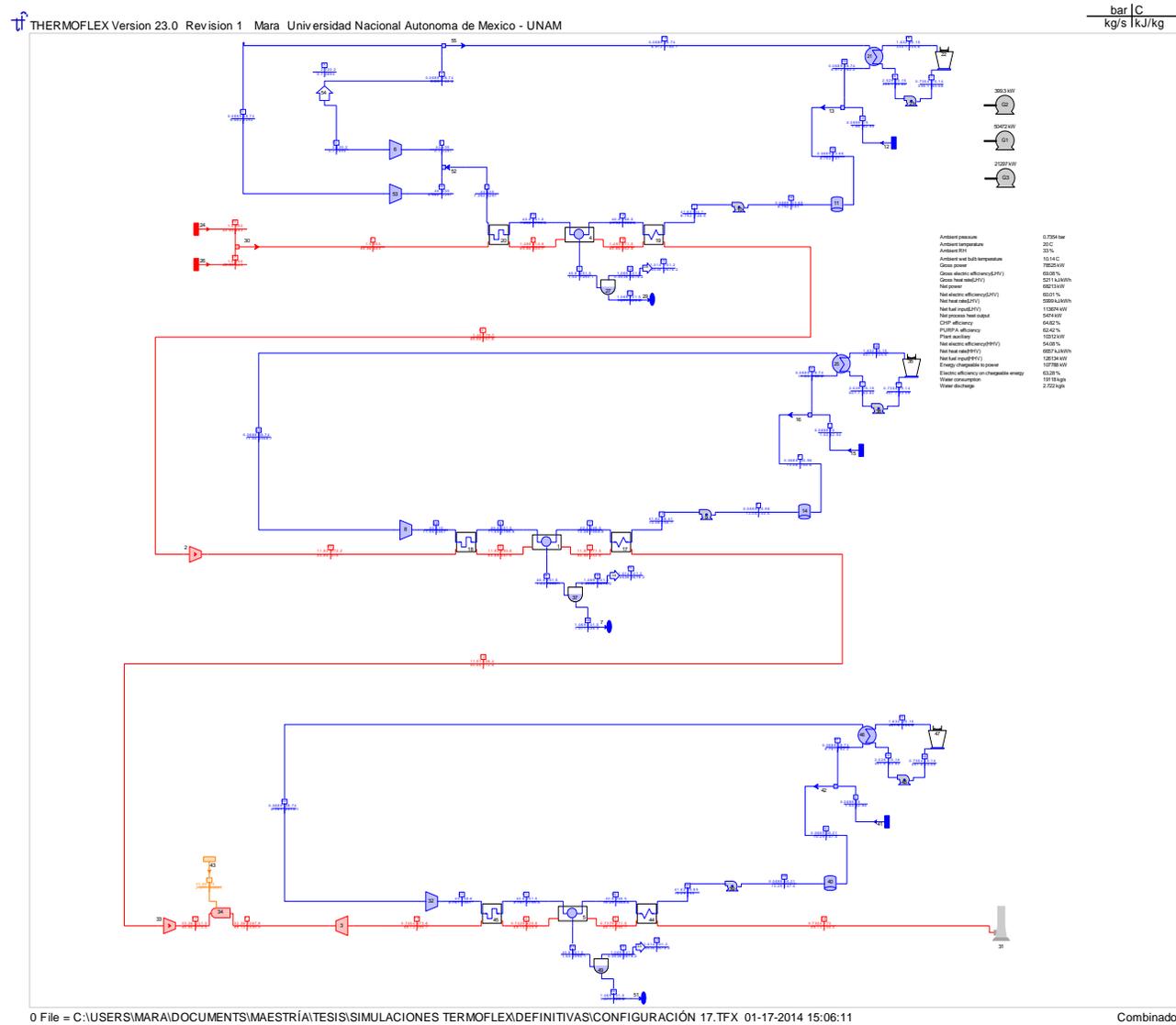
bar | C
kg/s | kJ/kg



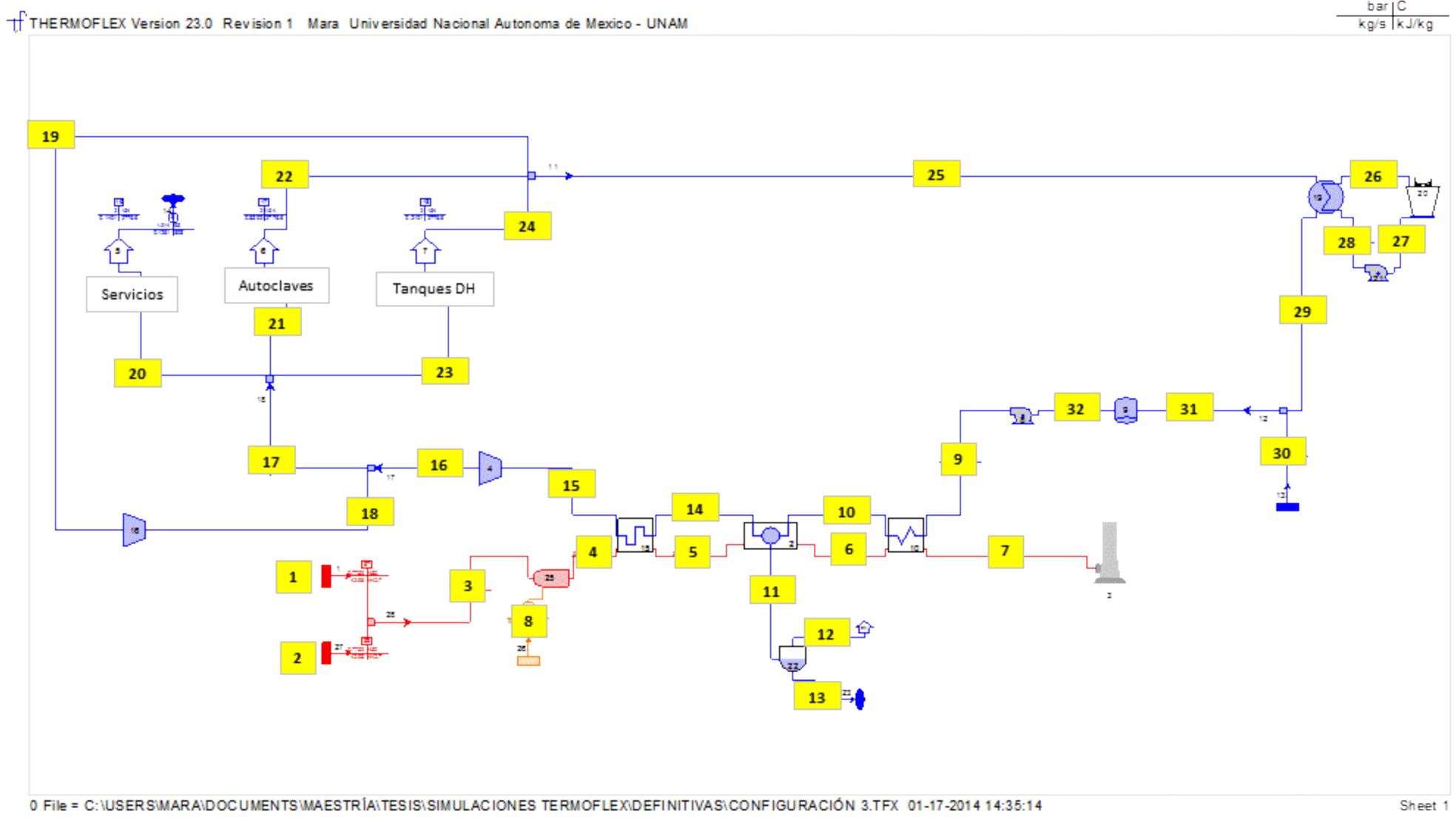
0 File = C:\USERS\MARA\DOCUMENTS\MAESTRÍA\TESIS\SIMULACIONES TERMOFLEX\DEFINITIVAS\CONFIGURACIÓN 10.TFX 01-15-2014 09:58:44

Combinado

ANEXO A11. Diagrama de proceso de la configuración 17 obtenido de THERMOFLEX.



ANEXO B1. Diagrama de proceso de la configuración 3. Numeración de las corrientes para la tabla de propiedades.





ANEXO B2. Diagrama de proceso de la configuración 8. Numeración de las corrientes para la tabla de propiedades.

