



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO DE SISTEMAS
DE COGENERACIÓN PARA EL USO EFICIENTE DE
ENERGÍA”**

Tesis para obtener el grado de Ingeniero Químico

P R E S E N T A

ALUMNO: NOHEL MAURICIO PÉREZ VILLA

ASESOR: DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA

SEPTIEMBRE 2020

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA, MORELIA MICHOACÁN, MÉXICO.

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. ANTECEDENTES.....	7
3. JUSTIFICACIÓN.....	10
4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	11
OBJETIVO GENERAL	11
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	11
HIPÓTESIS	12
5. MARCO TEÓRICO.....	13
6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
ENFOQUE DEL DISEÑO.....	18
FUNCIÓN DE COSTO.....	23
CORRELACIONES PARA LAS PROPIEDADES TERMODINÁMICAS	26
EFICIENCIA ISENTRÓPICA PARA LA TURBINA	28
EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	29
EMPLEOS GENERADOS	29
SOLUCIÓN PROPUESTA PARA EL CICLO DE RANKINE	31
CASO DE ESTUDIO.....	32
7. SOLUCIÓN.....	34
8. CONCLUSIÓN	42
9. NOMENCLATURA	43
SÍMBOLOS GRIEGOS	45
10. REFERENCIAS	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Cogeneración con motor de gas y turbina de vapor.....	14
Figura 2 Ciclo de Rankine.....	17
Figura 3 Diseño propuesto	19
Figura 4 Optimización basada en el algoritmo genético	20
Figura 5 Incorporación del modelo de simulación en la formulación de optimización	22
Figura 6 Diagrama de flujo simplificado para la instalación del procesamiento químico especializado	33
Figura 7 Gran curva compuesta para el estudio del caso presentado	34
Figura 8 Solución Pareto para la minimización del CAT y la minimización de las EGEI	36
Figura 9 Combustibles usados para la solución óptima presentada en la Figura 8	37
Figura 10 Solución Pareto para el CAT versus el número de trabajos para el caso de estudio.....	40
Figura 11 Combustibles usados para el caso óptimo presentado en la Figura 10	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Los coeficientes de regresión utilizados en la eficiencia isentrópica en la turbina.	28
Tabla 2 Datos de corrientes para el procesamiento químico especializado	33
Tabla 3 Datos de unidad para los combustibles del caso de estudio	35
Tabla 4 Solución óptima para la curva Pareto del CAT vs las EGEI.....	38

RESUMEN

El proceso de cogeneración es una estrategia efectiva para la exploración de aspectos positivos de la combinación de calor y energía en los procesos industriales. Tradicionalmente, las decisiones para procesos de cogeneración han sido basadas principalmente en el criterio económico. Con el creciente interés en las cuestiones de sustentabilidad, hay necesidad de considerar los aspectos económicos, ambientales y sociales en el diseño de procesos de cogeneración. El objetivo de esta tesis es desarrollar una estrategia de optimización para el diseño de sistemas de cogeneración de procesos considerando aspectos económicos, ambientales y sociales. Los procesos de integración son usados como la estructura para la formulación de la optimización. Primero, la integración de procesos se considera para identificar los requerimientos de servicios externos. Luego, un sistema de vapor con múltiples niveles de temperatura es diseñado, optimizando su impacto en los costos fijos y de operación, emisiones de gases de efecto invernadero y trabajos. Un algoritmo genético es desarrollado para resolver el problema de optimización. Las interacciones entre los diferentes objetivos económicos, ambientales y sociales son estudiadas mediante curvas de Pareto. Un caso de estudio es resuelto para ilustrar la aplicación del procedimiento propuesto.

PALABRAS CLAVE: Combinación de calor y energía. Integración de energía. Proceso de integración. Emisiones de gases de efecto invernadero. Cogeneración. Optimización.

ABSTRACT

Process cogeneration is an effective strategy for exploiting the positive aspects of combined heat and power in the process industry. Traditionally, decisions for process cogeneration have been based mostly on economic criteria. With the growing interest in sustainability issues, there is need to consider economic, environmental, and social aspects of cogeneration. The objective of this thesis is to develop an optimization framework for the design of process cogeneration systems with economic, environmental, and social aspects. Process integration is used as the coordinating framework for the optimization formulation. First, heat integration is carried out to identify the heating utility requirements. Then, a multi-header steam system is designed and optimized for inlet steam characteristics and their impact on power, fixed and operating costs, greenhouse gas emissions, and jobs. A genetic algorithm is developed to solve the optimization problem. Multi-objective tradeoffs between the economic, environmental, and social aspects are studied through Pareto tradeoffs. A case study is solved to illustrate the applicability of the proposed procedure.

KEYWORDS: Combined heat and power. Energy integration. Process integration. Greenhouse gas emissions. Cogeneration. Optimization.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental global ha aumentado al paso del tiempo, y en las últimas décadas las concentraciones de CO₂ y otros gases se han elevado, por lo que se han realizado diferentes investigaciones y acciones sobre cómo reducir los efectos que causan este aumento. La concentración global promedio de CO₂ está proyectada a incrementar de 379 ppm en el 2005 hacia un rango de valores alarmantes de 730 a 1020 ppm en el 2100 (Solomon et al. 2007). Actualmente la concentración global promedio de CO₂ es de 416 ppm aproximadamente. La demanda de energía creciente, el agotamiento de las fuentes de energía fósil y el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero (EGEI), constituyen algunos de los más serios retos para el desarrollo sustentable alrededor del mundo. Sin las correcciones sustanciales en las fuentes y el uso de energía, el mundo se enfrentará a los mayores contratiempos económicos, ambientales, sociales y de salud. En esto radica el interés en los sistemas de cogeneración de procesos, ya que las mayores fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero son de procesos industriales y plantas de energía.

Para tener una mayor eficiencia en la industria se puede genera un sistema de integración de corrientes y equipos interconectados. Para esto se requiere de la comprensión y análisis del proceso. Por lo que los recursos para la integración de procesos son un elemento crítico en el diseño, operación costo-beneficio y procesos sustentables. Debido a la fuerza de interacción entre las unidades de proceso, recursos, corrientes y objetivos, la integración de procesos ofrece un marco único junto con un grupo efectivo de metodologías y herramientas para el diseño sustentable. La fuerza y el atractivo de la integración de procesos se deriva de su capacidad de ofrecer sistemáticamente lo siguiente (El-Halwagi 1997):

- Comprensión fundamental de las ideas globales de un proceso y las causas raíz de las limitaciones del funcionamiento.
- Capacidad de comparar el rendimiento de diversos objetivos para el proceso antes de los detalles del diseño, mediante objetivos técnicos.
- Generación y proyección efectiva de soluciones alternativas para realizar la mejor clase de diseño y estrategias de operación.

En las últimas tres décadas, muchos avances se han realizado en el área de integración de procesos. Esto incluye varias contribuciones clave en el área de integración de energía, la cuál es una metodología sistemática que proporciona una comprensión fundamental del uso de energía dentro del proceso y emplea esta comprensión para identificar objetivos de energía y optimizar sistemas calor-recuperación y energía-servicios externos (El-Halwagi 1997). Los procesos industriales cuentan con requisitos duales de calor y energía. En muchos procesos, las dos cuestiones son tratadas por separado: la energía es adquirida de un lugar fuera de sitio y el calor es producido dentro de sitio mediante la combustión de combustibles fósiles. Hay emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la energía importada y la generación de calor. Una mayor oportunidad para la reducción de costos y mejorar la eficiencia en los procesos industriales es asociar y combinar la energía y el calor (CCE). La idea clave de los procesos de combinación de energía y calor (CCE), integra los diversos requisitos de corrientes frías y calientes en el proceso como son las diversas fuentes de combustible. Cuando las turbinas de extracción son usadas, el vapor de salida de la turbina puede ser usado para propósitos de calentamiento. Como tal, el combustible puede ser usado para propósitos duales de generación de energía y calor. Así se reduce significativamente el costo y las emisiones. A esto se refiere la “cogeneración” o “combinación calor y energía” (CCE). Mientras que la cogeneración es utilizada a menudo en plantas de energía, esto no es comúnmente usado (o no usada para su medida adecuada) dentro de instalaciones industriales.

2. ANTECEDENTES

Muchos métodos han sido usados para evaluar las ventajas de la cogeneración de un proceso. Dhole y Linnhoff (1992) propusieron usar un análisis de energía para estimar las ventajas de la cogeneración. La energía es una medida del trabajo útil disponible en una fuente de calor. Raissi (1994) desarrollo el modelo TH-shaftwork, el cual está basado sobre una observación de la entalpia especifica de la salida de la turbina menos la entalpia específica del vapor saturado, y es una constante relativa independiente de las condiciones de salida. El modelo TH-shaftwork combina esta observación con la observación de que la energía especifica puede ser aproximada por una función lineal de la temperatura de saturación de la salida (Klemes et al. 1997). Técnicas de programación matemática han sido creadas en el área de modelación y optimización de sistemas de redes de turbinas. El modelo de turbinas (Mavromantis y Kokossis 1998; Mavromantis 1996) está basado en la línea de Willans (comúnmente usado en el modelo de turbinas para representar el vapor consumido contra potencia nominal de la turbina) y utiliza graficas típicas de máxima eficiencia y reglas generales para apuntar al potencial de cogeneración. El modelo de Hardware de la turbina también incorpora turbinas complejas al modelarlas como conjuntos de turbinas más simples. El-Halwagi et al. (2009) desarrollaron una herramienta de visualización para la focalización y el diseño del sistema de cogeneración. Mohan y El-Halwagi (2007) desarrollaron un procedimiento algebraico para la focalización de la cogeneración e incluyo la biomasa como una de las fuentes de energía. Al-Azri et al. (2009) desarrollaron un enfoque algorítmico de acceso directo para la optimización de los sistemas de cogeneración. Mahmud et al. (2012) presentaron un procedimiento para el diseño simultaneo de CCE junto con la integración de masa. El concepto de CCE puede extenderse aún más a la combinación de enfriamiento, calentamiento y energía (CECE), que comúnmente se conoce como trigeneración. Se pueden encontrar detalles sobre la trigeneración en las ilustraciones de la literatura (Al-Sulaiman et al. 2010; Wu y Wang 2006). Tora y El-Halwagi (2011) proporcionaron un enfoque de diseño conceptual para los sistemas de trigeneración que integraron el exceso de calor del proceso (después de la integración del calor) con formas externas de energía (por ejemplo: combustibles fósiles y energía solar). Ponce JM et al. (2013) proponen una metodología que

incluye la selección de fuentes de energía primaria adecuadas (es decir, combustibles fósiles, biomasa, biocombustibles y energía solar) para la generación sostenible de electricidad. Ubando A et al. (2013) utilizan un modelo de programación fraccional difusa para diseñar un sistema de trigeneración, teniendo en cuenta dicha asignación. El modelo permite resolver una configuración que proporciona la huella de carbono mínima para cada flujo de energía. Ponce JM et al. (2014) presentan un enfoque donde utilizan la optimización de objetivos múltiples para diseñar sistemas de cogeneración residenciales basados en una nueva superestructura que permite satisfacer las demandas de agua caliente y electricidad al mínimo costo y al mínimo impacto ambiental. Hipólito BJ et al. (2014) proponen un sistema integrado de trigeneración que se basa en una nueva superestructura formulada como un modelo de programación no lineal de entero mixto multiobjetivo, donde el sistema de servicios públicos que está constituido por un ciclo de vapor Rankine (para producir energía eléctrica y servicios de calefacción), un ciclo orgánico de Rankine (para recuperar el calor residual y producir energía eléctrica) y un ciclo de absorción de refrigeración (para recuperar el calor residual y proporcionar refrigeración). Abdelhady F et al. (2015) proponen un enfoque de optimización para el diseño de procesos de sistemas combinados de calor y energía que en conjunto integran el perfil térmico del proceso, un combustible fósil externo y energía solar. Kamrava S et al. (2015) se basan en el diseño simultáneo y la optimización operativa donde las fuentes de combustión clave, causas, y las consecuencias de los trastornos del proceso se identifican y luego se incluyen en el perfil de energía del proceso para diseñar un sistema combinado de calor y energía. Lira LF et al. (2015) la solución del problema de optimización la llevan a cabo mediante un enfoque de descomposición jerárquica, un algoritmo genético y el método de restricción para resolver el problema de optimización de objetivos múltiples. G.S. Krishna Priya y Santanu Bandyopadhyay (2017) utilizan una técnica de optimización algebraica y eficiente sobre el punto de análisis que se han aplicado a una amplia gama de problemas que van desde redes de agua hasta sistemas de energía. Zhou H et al. (2017) utilizan el método LCA (evaluación del ciclo de vida) para analizar el consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero, el costo y los efectos locales en el empleo de la producción de combustibles líquidos a partir de estas materias primas. Ng RTL et al. (2017) presentan una técnica algebraica: análisis de cascada de vapor (SCA) para determinar los objetivos para caudales de vapor (fuentes de vapor únicas y múltiples) y potencial de cogeneración para una

red de distribución de vapor, antes del diseño detallado del sistema. Shankar A et al. (2018) señalan tres áreas de aplicación del modelado y simulación de sistemas energéticos: diseño óptimo y operación de procesos flexibles usando pronósticos de demanda y precio, análisis de sostenibilidad y diseño de procesos utilizando métodos híbridos, teniendo en cuenta los efectos de retroalimentación de las tecnologías innovadoras. Fernández F et al. (2018) realizaron un modelo OR completo (función objetivo y restricciones) para los problemas de cogeneración.

3. JUSTIFICACIÓN

A pesar de la utilidad de las herramientas de investigación existentes en la integración y cogeneración energética, estas sufren una o más de las siguientes limitaciones:

- Las condiciones del vapor saturado y la turbina están fijas (por ejemplo: las temperaturas y presiones de entrada y salida no están optimizadas)
- No se incorporan fuentes de energía renovables (por ejemplo: biocombustibles)
- La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero no se considera
- No se consideran los efectos de las políticas de las emisiones de gases de efecto invernadero (por ejemplo: impuesto, crédito de carbono)
- No se aborda el impacto social

Es importante destacar que este trabajo supera todas las limitaciones antes mencionadas, así mismo maximiza y minimiza trabajos y emisiones (EGEI) respectivamente. A demás se propone un algoritmo con una mayor eficiencia que proporciona un manejo sustentable.

4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un procedimiento sistemático que pueda determinar el uso de las diversas formas de energía, el uso óptimo de los servicios externos y las especificaciones óptimas del sistema de cogeneración, al tiempo que se tienen en cuenta los objetivos económicos, ambientales y sociales. Específicamente, los procedimientos desarrollados deben responder a las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las cantidades y niveles óptimos de servicios de calentamiento y enfriamiento?
- ¿Cuánto de cada combustible debe usarse?
- ¿A qué temperatura y nivel de presión se debe generar el vapor a partir del combustible externo?
- ¿Existe un potencial para la cogeneración de energía? ¿Cuáles son las especificaciones de diseño y el objetivo de cogeneración?
- ¿Cuál es el impacto de las emisiones (EGEI) y cuáles son las compensaciones/subsidios de las emisiones (EGEI) necesarios?
- ¿Cuáles son los impactos económicos, ambientales y sociales de la cogeneración y como se pueden conciliar o intercambiar estos objetivos?

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar un algoritmo genético que tenga una mayor eficiencia en la resolución de problemas de sistemas de cogeneración. Así mismo realizar una aportación a las investigaciones de sistemas de cogeneración de procesos.
- Desarrollar un modelo de optimización multi-objetivo considerando la minimización de emisiones (EGEI) en los procesos industriales y realizar un aporte social.
- Reducir los costos anuales totales (CAT).
- Aplicar el modelo propuesto a un caso de estudio de un proceso industrial.

HIPÓTESIS

De acuerdo a la situación ambiental actual, es de gran importancia generar nuevos sistemas que ayuden a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, pero también a obtener una mayor eficiencia energética. Al implementar un modelo matemático, la optimización multi-objetivo de sistemas de cogeneración y un algoritmo genético se logrará formular un modelo de optimización con el cual obtendremos valores de condiciones de operación optimizadas, que se utilizaran para formar las curvas Pareto las cuales nos ayudarán a tomar la decisión más óptima sobre un caso de estudio de un proceso industrial para obtener menores emisiones de gases de efecto invernadero, reducir costos anuales totales, generar más empleos, saber que biocombustibles y combustibles fósiles utilizar y obtener una mayor eficiencia de energía.

5. MARCO TEÓRICO

Se propone un enfoque de diseño jerárquico. La integración de procesos se utiliza como marco de coordinación para la formulación de optimización. Primero, la integración de calor se lleva a cabo para identificar los requisitos de calentamiento. Luego, se diseña y optimiza un sistema de vapor de múltiples corrientes para las características del vapor de entrada y su impacto en la energía, los costos fijos y operativos, las emisiones de gases de efecto invernadero y los trabajos. Se desarrolla un algoritmo genético para resolver el problema de optimización. Las compensaciones múlti-objetivo entre los aspectos económicos, ambientales y sociales se estudian a través de las curvas de Pareto. Se resuelve un caso de estudio para ilustrar la aplicación del procedimiento propuesto.

Cogeneración: Es un sistema de alta eficiencia energética, significa producción simultánea de dos o más tipos de energía. Normalmente las energías generadas son electricidad y calor, aunque puede ser también energía mecánica y calor (y/o frío) a partir de la energía primaria. Esta energía primaria se suele obtener mediante la combustión de combustibles fósiles como el gas o el petróleo. La producción simultánea supone que puede ser utilizada simultáneamente, lo que implica proximidad de la planta generadora a los consumos. Hay que recordar que la termodinámica obliga a la evacuación de una cierta cantidad de calor en todo proceso térmico de producción de electricidad, ya que todo el calor absorbido no puede transformarse en trabajo. El objetivo de la cogeneración es que no se pierda esta gran cantidad de energía. Señalamos a continuación las principales características diferenciales de la cogeneración:

- a) Se aprovecha varios tipos de energía. A su vez este mayor rendimiento da origen a tres de sus mayores ventajas: menor consumo de combustible, coste de producción menor y menor impacto ambiental.
- b) Se produce la energía donde se consume, por lo que hay menores pérdidas por transporte y aumenta la autonomía de las industrias.

Una central termoeléctrica tradicional transforma la energía química contenida en un combustible fósil en energía eléctrica. Normalmente se quema un combustible fósil (carbón,

fuelóleo, gas natural) para producir una energía térmica, misma que es convertida en energía mecánica, que mediante un alternador se transforma en energía eléctrica, de alta calidad.

El ciclo combinado con gas natural consiste en el aprovechamiento del calor en dos niveles, con dos ciclos uno de gas (con turbina de gas) y otro de vapor (con turbina de vapor). El resultado es que el rendimiento eléctrico conjunto llega al 60 %. La mayoría de los procesos industriales, comerciales o de servicios requieren calor a una temperatura relativamente baja, de forma que en estos procesos sí pueden aprovechar ese calor. Este diferente concepto de aprovechamiento energético es el que realizan las plantas de cogeneración, llegando a un rendimiento global que pueden oscilar entre el 75% y el 90% de la energía química contenida en el combustible.

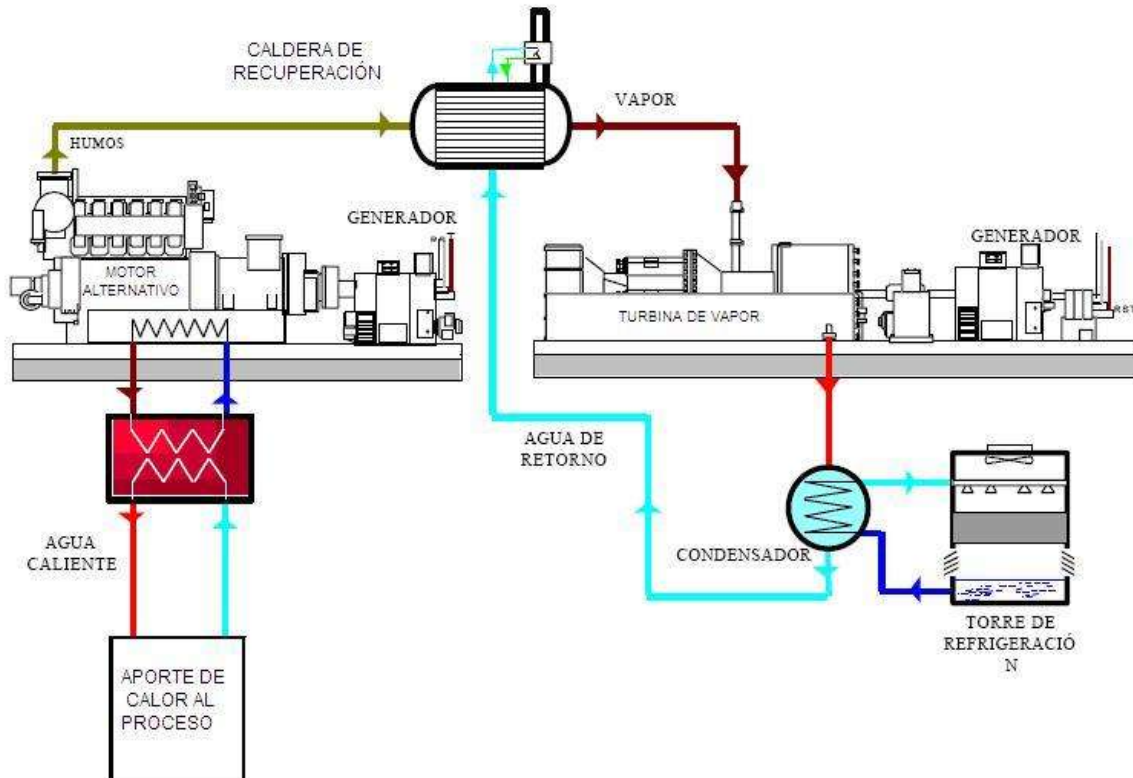


Figura 1 Cogeneración con motor de gas y turbina de vapor

El calor contenido en los humos de escape del motor se recupera en una caldera de recuperación, produciendo vapor que es utilizado en una turbina de vapor para producir más energía eléctrica o energía mecánica. El circuito de refrigeración de alta temperatura del motor se recupera en intercambiadores, y el calor recuperado se utiliza directamente en la

industria asociada a la planta de cogeneración. El rendimiento eléctrico en esta planta es alto, mientras que el térmico disminuye considerablemente. La cogeneración permite aprovechar el calor que no puede transferirse en energía eléctrica, y que de otro modo se tiraría.

Optimización: La optimización puede realizarse en diversos ámbitos, siempre con el mismo objetivo; mejorar el funcionamiento de un proceso o el desarrollo de un proyecto a través de una gestión perfeccionada de los recursos. En términos generales, se refiere a la capacidad de hacer o resolver alguna actividad de la manera más eficiente posible y, en el mejor de los casos, utilizando la menor cantidad de recursos. La optimización puede realizarse en distintos niveles, aunque lo recomendable es concretarla hacia el final de un proceso. En el área de las matemáticas, la optimización intenta aportar respuestas a un tipo general de problemas que consiste en seleccionar el mejor entre un conjunto de elementos.

Algoritmos genéticos: Basados en modelos computacionales de la evolución biológica natural, los algoritmos genéticos pertenecen a la clase de los algoritmos evolutivos, junto con la programación evolutiva, la evolución de estrategias y la programación genética. Los algoritmos genéticos (AG) son mecanismos de búsqueda basados en las leyes de la selección natural y de la genética. Combinan la supervivencia de los individuos mejor adaptados junto con operadores de búsqueda genéticos como la mutación y el cruce, de ahí que sean comparables a una búsqueda biológica. Fueron desarrollados por John Holland y Rechemberg que crearon algoritmos de optimización imitando los principios básicos de la naturaleza. Estos algoritmos se utilizan con éxito para gran variedad de problemas que no permiten una solución eficiente a través de la aplicación de técnicas convencionales. Tiene asimismo aplicaciones variadas en ingeniería, como es el diseño de piezas (turbinas, rotores, etc.), diseño y control de redes, planificación de tareas, síntesis de mecanismos, diseño de tolerancias, etc. y aplicaciones en otros gremios como en sistemas de computación paralelos (paralelización automática de programas secuenciales), química (optimización de procesos de producción, diseño tecnológico y de instalaciones), negocios y comercio (modelización de sistemas económicos complejos, predicción de mercados), medicina (análisis de datos en medicina, diagnóstico automático) o gestión (análisis de datos en gestión, asistentes de gestión, sistemas automáticos de decisión). Para la ingeniería, los algoritmos genéticos y la

programación evolutiva en general presentan oportunidades de plantearse problemas que no permiten una solución eficiente a través de la aplicación de técnicas convencionales.

Sustentabilidad: Sustentabilidad significa utilizar los recursos por debajo de los límites de renovación de los mismos, manteniendo así un permanente equilibrio. Hace referencia a la capacidad de desarrollar un sistema para satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos y oportunidades para el crecimiento y desarrollo futuro. En términos operacionales, promueve el progreso económico y social respetando los ecosistemas naturales y la calidad del medio ambiente.

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero: Son gases que se encuentran presentes en la atmósfera terrestre, su concentración atmosférica es baja, pero tienen una importancia fundamental en el aumento de la temperatura del aire próximo al suelo. Sin embargo, algunos gases minoritarios actúan en forma tal que permiten que la radiación solar penetre hasta la superficie terrestre y atrapan la radiación infrarroja ascendente emitida por el planeta, que de otro modo escaparía al espacio. De esta manera se genera un fenómeno denominado efecto invernadero, por analogía a lo que ocurre en los invernaderos, en los que el vidrio actúa permitiendo el paso de la radiación solar y retiene la radiación infrarroja emitida dentro del invernadero. El fuerte aumento observado desde la época industrial en la concentración de la mayoría de los gases de efecto invernadero, estaría altamente vinculado con el aumento registrado en la temperatura media global del último siglo. Por lo tanto, el hombre a través de sus actividades, es capaz de alterar un fenómeno beneficioso como es el efecto invernadero y provocar modificaciones en el clima, generando múltiples efectos en el equilibrio de los ecosistemas. Los gases de invernadero más importantes son: vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2) metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorocarbonos (CFC) y ozono (O_3) (MORAN, 1994).

Ciclo Rankine: Es el ciclo de vapor en las centrales de ciclo combinado y es la aplicación tecnológica del ciclo de Carnot para el caso de que el fluido motor sea un fluido condensable y durante su evolución se produzcan cambios de fase. De forma simplificada, y para el ciclo básico, la evolución del fluido sigue las siguientes etapas:

1. Una o varias etapas de elevación de la presión del fluido. El proceso se realiza con el fluido en fase líquida, con bombas y fuera de la zona de cambio de fase. Ésta es una de las principales diferencias con el ciclo de Carnot ya que, en sentido estricto, para obtener la máxima eficiencia sería necesario realizar la compresión de un fluido bifásico, con la dificultad tecnológica que ello conlleva.
2. Una etapa de aportación de calor a presión constante, que en los ciclos combinados se hace en la caldera de recuperación de calor por los gases de escape de la turbina o motor de gas. El fluido realiza una etapa de calentamiento previo en fase líquida, un proceso de cambio de fase y una elevación posterior de la temperatura del vapor en lo que se denomina sobrecalentado, motivada por la necesidad de disminuir la humedad en el vapor en las últimas etapas de expansión de la turbina. Esto último constituye la segunda particularidad del ciclo de Rankine y otra diferencia fundamental con el ciclo de Carnot.
3. Una etapa de expansión del fluido en fase vapor, realizada en una máquina térmica denominada turbina de vapor y lo más isentrópica posible.
4. A la salida de la turbina de vapor, una cesión de calor residual del vapor a presión constante en un dispositivo llamado condensador. En este dispositivo se realiza la condensación total del mismo y su paso a fase líquida.

El fluido motor empleado suele ser agua tratada, fundamentalmente por su facilidad de manejo, reposición y abundancia, aunque conceptualmente podrían emplearse otros fluidos tales como mercurio o fluidos orgánicos (Centrales terminacas de ciclo combinado, s.f.).

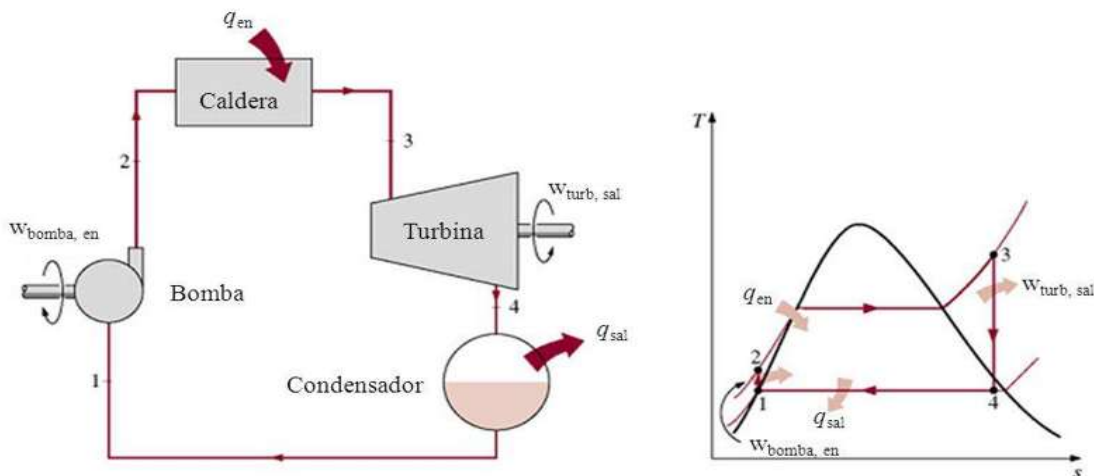


Figura 2 Ciclo de Rankine

6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema abordado se establece de la siguiente manera:

Se da lo siguiente:

- Un conjunto de corrientes calientes de proceso (por enfriar) y un conjunto de corrientes frías (por calentar). También se proporciona la capacidad calorífica (flujo nominal x calor específico) de cada corriente de proceso, $FC_{p,u}$, su temperatura de alimentación (entrada), T^s_u ; y su temperatura objetivo (salida) T^t_u , donde $u= 1, 2, \dots, N_H$. Además, la capacidad calorífica, $fC_{p,v}$, temperaturas de alimentación y objetivo, t^s_v y t^t_v , se dan para cada flujo del proceso, donde $v= 1, 2, \dots, N_C$.

Los servicios disponibles son los siguientes:

- Un conjunto de corrientes de calentamiento y enfriamiento cuyos flujos son desconocidos.
- Un conjunto de combustibles candidatos para ser utilizados para la generación de servicios de calefacción. Se desconoce el flujo de cada combustible, pero se conoce su costo.

Se desea desarrollar un procedimiento sistemático que pueda determinar el uso de las diversas formas de energía, el uso óptimo de los servicios externos y las especificaciones óptimas del sistema de cogeneración, al tiempo que se tienen en cuenta los objetivos económicos, ambientales y sociales. Se considera parte del planteamiento resolver las preguntas objetivo.

ENFOQUE DEL DISEÑO

El enfoque propuesto se muestra en la Fig. 3. Primero, se recopilan los datos de las corrientes para las tareas de calentamiento y enfriamiento del proceso, incluidas las temperaturas de entrada y salida, así como el flujo y la capacidad calorífica para cada corriente de proceso. Se consideran varios tipos de combustible. Además, los datos y modelos requeridos se recopilan para el ciclo de cogeneración, incluidos los modelos de turbinas, los costos, las emisiones de efecto invernadero y los trabajos generados para los combustibles considerados

para operar la caldera. El análisis del punto térmico o punto de pliegue se utiliza para establecer objetivos de servicios externos para la integración de calor entre las corrientes del proceso y para obtener el servicio mínimo de calentamiento y enfriamiento requerido. Las cargas de calentamiento se acoplan luego con el ciclo de cogeneración a través de un sistema de vapor común. Se desarrolla una formulación de optimización para determinar las especificaciones del sistema de cogeneración, los calores de vapor y los tipos y flujos de combustible.

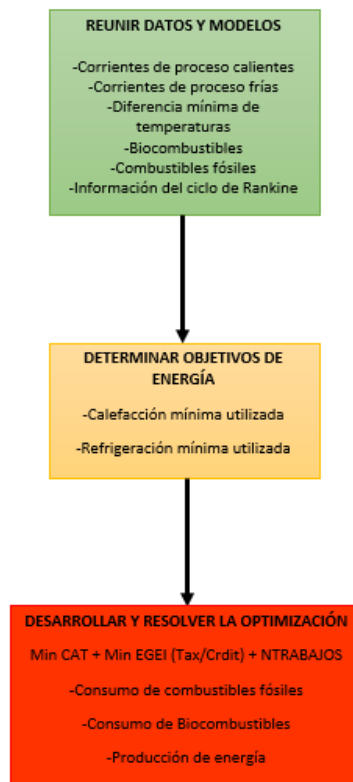


Figura 3 Diseño propuesto

La función objetivo tiene como prioridad minimizar el Costo Anual Total (CAT) que representa los costos fijos y operativos del sistema, el vapor producido por la energía y los impuestos/créditos asociados con las emisiones GEI. El modelo incluye técnicas y limitaciones económicas, ambientales y sociales.

El modelo de optimización general es altamente no lineal y no convexo; por lo tanto, el enfoque de optimización se basa en una combinación de algoritmos genéticos (AG) y programación lineal (PL) como se muestra en la Fig. 4, donde los valores utilizados para los

operadores del Algoritmo Genético se seleccionaron de los mejores valores de un proceso de capacitación llevado a cabo para este proceso. En este contexto, para un límite superior para las emisiones GEI (o un límite inferior para los TRABAJOS), se proporciona aleatoriamente una población inicial (es decir, un tamaño de población de 100 individuos) para un conjunto de valores de temperatura y presión de entrada a la turbina, pero estos valores están restringidos entre los límites superior e inferior factibles.

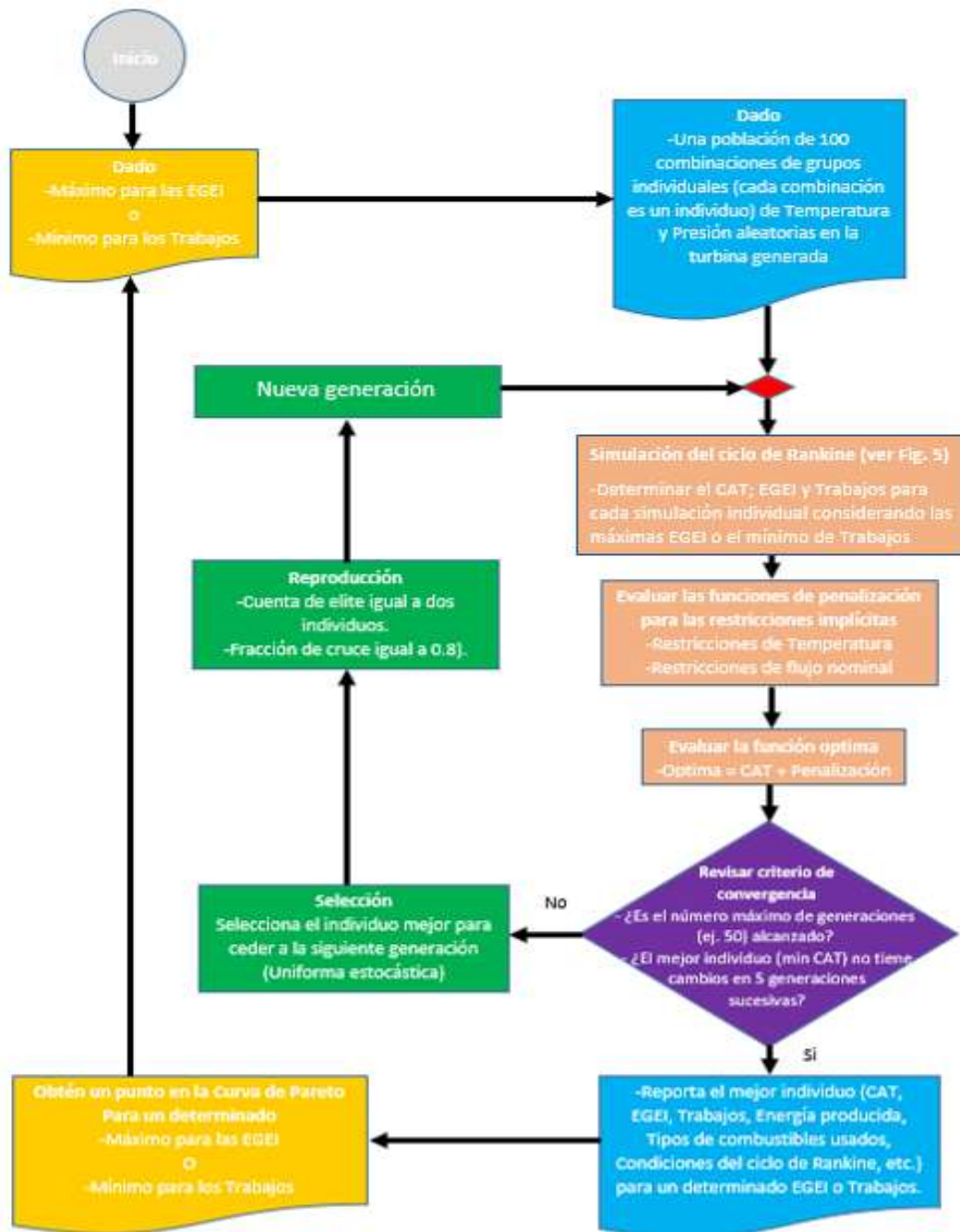


Figura 4 Optimización basada en el algoritmo genético

Estas combinaciones individuales de temperatura y presión se alimentan al modelo de simulación y se integran con el modelo de optimización (ver Fig. 5). Para cada conjunto de datos de entrada, se obtiene un valor de aptitud (CAT + Penalizaciones por las restricciones implícitas no satisfechas), luego se verifican los criterios de convergencia (por ejemplo, el número máximo de 50 generaciones o no aumentos en cinco generaciones sucesivas).

Si no se alcanzan los criterios de detención, el enfoque uniforme estocástico se usa para la selección de los mejores individuos para ser los padres de la próxima generación, y los padres seleccionados se usan para formar las próximas generaciones a través de las operaciones de conteo de élite (los dos mejores individuos permanecen en la próxima generación), cruza con una fracción transversal de 0.8 (dos individuos de la generación actual se combinan para producir un nuevo individuo) y mutan (se realiza un cambio aleatorio en un individuo dado de la población actual). Con esta nueva generación, el enfoque se repite hasta que se alcanzan los criterios de convergencia. Estos parámetros para las operaciones del algoritmo genético para resolver este problema se seleccionaron de diferentes valores analizados. Finalmente, este enfoque se repite para producir una curva de Pareto para los diferentes valores del límite superior de las EGEI (o límite inferior para los TRABAJOS).

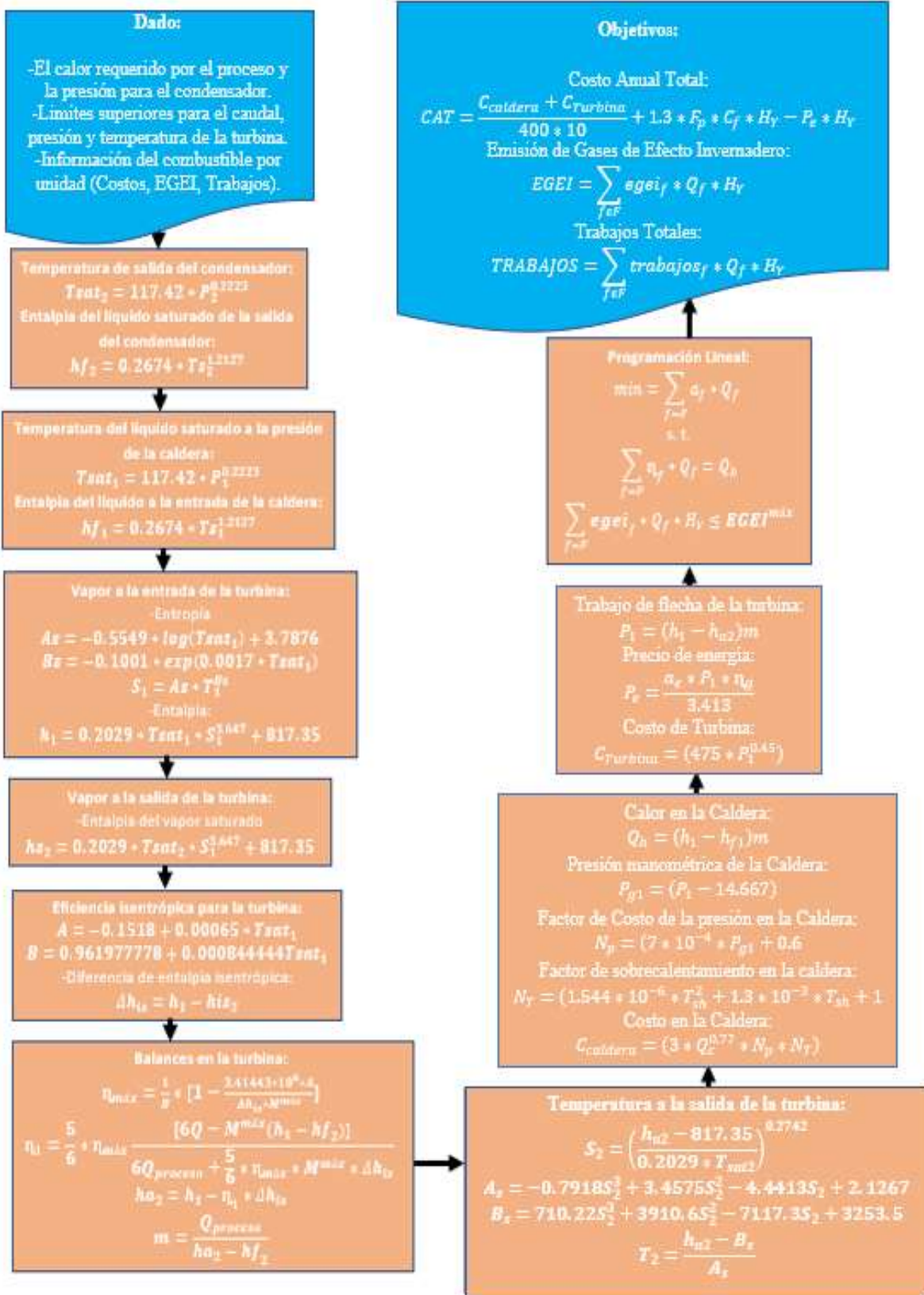


Figura 5 Incorporación del modelo de simulación en la formulación de optimización

FUNCIÓN DE COSTO

La función objetivo considera la minimización del costo anual total de generación, utilizando la siguiente correlación (Kumana et al. 2003):

$$\begin{aligned} Costo_g = Costo_{combustible} + Costo_w + Costo_{TAC} + Costo_p + Costo_a + Costo_b + \\ Costo_d + Costo_e + Costo_m \end{aligned} \quad (1)$$

La ecuación anterior establece que los costos de generación (Costg) son iguales a la suma del costo del combustible ($Costo_{combustible}$), el costo del suministro de agua cruda ($Costo_w$), el costo del tratamiento del agua de alimentación de la caldera, incluidos los costos de clarificación, ablandamiento y desmineralización ($Costo_{TAC}$), el costo de energía de bombeo de agua de alimentación ($Costo_p$), el costo de energía del ventilador de aire de combustión ($Cost_a$), los cargos de alcantarillado por purga de la caldera ($Costo_b$), el costo de eliminación de cenizas ($Costo_d$), el costo de control de emisiones ambientales ($Coste$) y los materiales de mantenimiento y costo laboral ($Costo_m$). Toda la información para los costos asociados está en \$/MMBtu.

El costo del combustible depende del tipo y la cantidad de combustible seleccionado en el proceso de optimización y esto se modela de la siguiente manera:

$$Costo_{combustible} = \sum_{f \in F} a_f * Q_f * 10^{-6} \quad (2)$$

Donde: a_f es el costo unitario del combustible f (\$/MMBtu); tenga en cuenta que esto considera el combustible en las plantas y, por lo tanto, se consideran todos los costos asociados con el transporte y las producciones, Q_f es la cantidad de calor transferido desde la combustión del combustible f al vapor en la caldera (Btu/h).

Este Q_f se determina considerando la eficiencia de la caldera asociada a cada combustible f (η_c) y el calor requerido en la caldera (Q_c) de la siguiente manera:

$$Q_c = \sum_{f \in F} Q_f * \eta_f \quad (3)$$

Aquí Q_c es el calor requerido en la caldera, y η_f es la eficiencia en la caldera para el combustible f . Es de destacar que las restricciones adicionales para la disponibilidad de los diferentes combustibles se pueden incluir fácilmente en el modelo. El calor en la caldera se determina mediante el siguiente balance de energía en la turbina:

$$Q_c = m(h_1 - hf_1) \quad (4)$$

Donde: m es el flujo de vapor (lb/h), h_1 es la entalpía del vapor en la entrada de la turbina (Btu/lb), y hf_1 es la entalpía del agua de alimentación de la caldera asumida en el punto de líquido saturado (Btu/lb).

El costo de mantenimiento de la caldera es el 30% del costo del combustible (Kumana et al. 2003) y F_p representa el factor de flexibilidad para el aumento de la presión (ver Branan 2002):

$$C_g = 1.3 * F_p * Costo_{combustible} \quad (5)$$

La ganancia obtenida por la energía eléctrica producida (P_e en \$/kWh) viene dada por la siguiente relación:

$$P_e = \frac{a_e * P_t * \eta_g}{3.413} \quad (6)$$

Aquí a_e es el precio de la energía eléctrica (\$/kWh), η_g es la eficiencia del generador y P_t es la potencia de salida del eje de la turbina (Btu/h) determinada por la siguiente relación:

$$P_t = m(h_1 - ha_2) \quad (7)$$

Donde: h_1 y h_2 son las entalpías para el vapor en la entrada de la turbina y la entalpía real en la salida de vapor (Btu/lb).

El costo de capital para la caldera ($C_{Caldera}$) se supone como una caldera de tubo de agua alimentada con petróleo o gas y se determina como sigue:

$$C_{Caldera} = 3 * N_p * N_T * Q_c^{0.77} \quad (8)$$

Donde: N_p es el factor para explicar la presión de operación y está dado por:

$$N_p = 7 * 10^{-4} * P_{g1} \quad (9)$$

P_{g1} es la presión manométrica en la caldera (psig), y N_T es un factor para la temperatura de sobrecalentamiento, y está dada por:

$$N_T = 1.5 * 10^{-6} * T_{sh}^2 * 1.13 * 10^{-3} * T_{sh} + 1 \quad (10)$$

Donde: T_{sh} es la temperatura de sobrecalentamiento (°F) dada por:

$$T_{sh} = T_1 + T_{sat1} \quad (11)$$

El costo capital para una turbina sin condensación está dado por:

$$C_{Turbina} = 475 * P_t^{0.45} \quad (12)$$

Para diseños de base, el Costo Anual Total se determina de la siguiente manera:

$$CAT = 1.3 * F_P * C_{Combustible} * H_Y * K_F * C_{Caldera} + K_F * C_{Turbina} - P_e * H_Y \quad (13)$$

Donde: H_Y es el tiempo de operación anual (h/año), K_F es el factor utilizado para anualizar los costos de capital (año⁻¹), $C_{caldera}$ es el costo de capital de la caldera (\$), $C_{turbina}$ es el costo de capital de la turbina (\$).

CORRELACIONES PARA LAS PROPIEDADES TERMODINÁMICAS

Las propiedades termodinámicas para la corriente en el ciclo de Rankine son muy complicadas debido a que se propone un enfoque eficiente para manipularlas en el contexto de optimización basado en un enfoque de Algoritmo Genético. De esta manera, se utilizan las siguientes correlaciones de datos experimentales (ver Al-Azri et al. 2009).

La temperatura de saturación T_{sat1} (°F) en función de la presión P_1 (psi) se da de la siguiente manera:

$$T_{sat1} = 112.72 * P_1^{0.2289} \quad (14)$$

La entropía S (Btu/lbR) en la entrada de la turbina en términos de presión (psi) y temperatura (°F) viene dada por:

$$S = [-0.5549 * \ln(T_{sat1}) + 3.7876] * T^{0.1001 * \exp(0.0017 * T_{sat})} \quad (15)$$

Donde: T_{sat1} (°F) corresponde a la temperatura de saturación correspondiente a la presión de entrada a la turbina. La aplicabilidad para esta correlación es de hasta 2,500 psi y hasta 1,500 °F con un error relativo de 3.5% (Al-Azri et al. 2009).

La entalpía (Btu/lb) es una función de la temperatura de saturación (°F) y la entropía (Btu/lbR):

$$h_1 = 0.2027 * T_{sat1} * S^{3.647} + 817.35 \quad (16)$$

El error relativo es 0.6%, y esta relación es válida entre la presión atmosférica y 2,000 psi.

La entalpía de salida real de la turbina ha_2 se da en términos de la eficiencia de la turbina ($\eta_{turbina}$), la entalpía isentrópica de salida (his_2) y la entalpía de entrada (h_1) de la siguiente manera:

$$ha_2 = h_1 - \eta_{turbina}(h_1 - his_2) \quad (17)$$

La entropía de salida de la turbina está correlacionada con la temperatura de saturación (T_{sat1}) y la entalpía real (ha_2) de la siguiente manera:

$$S = \left(\frac{ha_2 - 817.35}{0.2029 * T_{sat1}} \right)^{0.2742} \quad (18)$$

La temperatura de salida (T_{sat1}) se obtiene en términos de entropía y entalpía de la siguiente manera:

$$T = \frac{ha_2 - B_s}{A_s} \quad (19)$$

Donde los parámetros de A_s y B_s son dados por:

$$A_s = -0.7918 * S^3 + 3.4575 * S^2 - 4.5513 * S + 2.1267 \quad (20)$$

$$B_s = 710.22 * S^3 - 3910.6 * S^2 + 7117.3 * S - 3253.5 \quad (21)$$

Las correlaciones anteriores son válidas para un sobrecalentamiento de hasta 500 °F con un error relativo del 5%.

La entalpía del fluido saturado h_f (Btu/lb) se calcula en función de la temperatura de saturación (°F) de la siguiente manera:

$$h_{f1} = 0.2674 * T_{sat1}^{1.2127} \quad (22)$$

El error relativo es 3%.

El caudal másico m se determina en términos del requisito de calentamiento en el proceso ($Q_{proceso}$), la entalpía real a la salida de la turbina (ha_2) y la entalpía del fluido saturado a la presión de salida (h_{f2}):

$$m = \frac{Q_{proceso}}{ha_2 - hf_2} \quad (23)$$

EFICIENCIA ISENTRÓPICA PARA LA TURBINA

Se utiliza la eficiencia isentrópica para turbinas desarrolladas por Mavromatis y Kokossis (1998). Esta expresión correlaciona la carga con la potencia de salida de la siguiente manera:

$$\eta_{is} = \frac{6}{5B} \left(\frac{3.41443 \cdot 10^6 \cdot A}{\Delta h_{is} \cdot M^{max}} \right) \left(1 - \frac{M^{max}}{6 \cdot m} \right) \quad (24)$$

donde A y B son parámetros que dependen del tipo de turbina, la temperatura de saturación de entrada en (°F) y el caudal (lb/h) como sigue:

$$A = a_0 + a_1 + T_{sat} \quad (25)$$

$$B = a_1 + a_2 + T_{sat} \quad (26)$$

Y la Tabla 1 muestra las constantes de correlación para expresiones anteriores (ver Varbanov et al. 2004; Mavromatis y Kokossis 1998). El diferencial de entalpía (Δh_{is}) se determina de la siguiente manera:

$$\Delta h_{is} = h_1 - ha_2 \quad (27)$$

Tabla 1 Los coeficientes de regresión utilizados en la eficiencia isentrópica en la turbina.

	Turbinas de contrapresión		Turbinas de condensación	
	W<4.10 MMBtu/s	W>4.10 MMBtu/s	W<5.12 MMBtu/s	w>5.12 MMBtu/s
a_0 (Btu/s)	-0.15180	-1.03876	-0.011588	-0.06249
a_1 (Btu/s°F)	0.00065	0.00346	0.00056	0.00078
a_2	0.96198	1.11164	1.19523	1.16647
a_3 (°F)	0.00084	0.00026	0.00033	0.00017

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Las emisiones netas de gases de efecto invernadero (EGEI) se miden a través de la siguiente relación:

$$EGEI = \sum_{f \in F} egei_f * Q_f * H_Y \quad (28)$$

donde $egei_f$ es la unidad de emisión de gases de efecto invernadero para el combustible f , Q_f es la carga de calor para el combustible f , y H_Y son las horas que opera la planta.

EMPLEOS GENERADOS

Incluir las métricas sociales en el enfoque de optimización no es una tarea fácil. Hay varias dimensiones relacionadas con los impactos sociales con respecto al consumo de diferentes combustibles, incluidos los empleos generados, la aceptación del propietario de la materia prima, las métricas de uso de la tierra, el agotamiento del suelo, la disponibilidad de materia prima y los costos de transporte, entre otros. Para considerar una dimensión del impacto social, se incluye como función objetivo la maximización del número de empleos generados. Además, la disponibilidad de materia prima se puede incluir en el modelo de optimización como una restricción en el modelo de programación lineal interno que se muestra en la Fig. 5, y los costos unitarios para cada combustible utilizado en la ecuación (2), la cual representa el costo del combustible en la planta, incluido el transporte.

Los empleos generados netos asociados con el uso de diferentes combustibles son un tema muy importante relacionado con el impacto social por el uso de diferentes combustibles, y esto puede usarse para promover el uso de los biocombustibles porque su uso aumenta significativamente este número. Luego, el número de trabajos (TRABAJO) generados para el uso de diferentes combustibles se relaciona con la siguiente expresión:

$$TRABAJO = \sum_{f \in F} trabajos_f * Q_f * H_Y \quad (29)$$

En la ecuación anterior, trabajos_f es el número unitario de trabajos para el combustible f , y Q_f es la carga para el combustible f . El modelo de Impacto en el Desarrollo Económico y Empleo (JEDI) (JEDI 2020) del NREL se utilizó para evaluar la generación de la unidad de trabajos (trabajos_f) para cada combustible antes del proceso de optimización. Este modelo utiliza un análisis multiplicador de entrada-salida (Miller y Blair 2009), donde un multiplicador es una relación simple de cambio sistémico total (por ejemplo, empleo) de una actividad económica dada. Los multiplicadores se estiman a través de modelos económicos input-output (E-S). Para implementar este modelo E-S para los combustibles considerados en esta tesis, se consideraron todos los trabajos relacionados con la cadena de suministro para las fases de construcción y operación, materiales, mano de obra, bienes y servicios en los diferentes sectores (ver You et al. .2012). Esto considera diferentes impactos llamados directos, indirectos e inducidos, y el efecto total se calcula sumando los tres efectos (esto se estimó usando el modelo IMPLAN (IMPLAN 2020). Para tener en cuenta el uso de la tierra, se utilizó la siguiente relación: $\text{TIERRA} = \sum_{f=F} \text{Tierra}_f \times Q_f \times H_Y \times \eta$, la cual se puede usar; donde Tierra_f es el área requerida para la producción de una cantidad dada de energía para el combustible f . Finalmente, impactos sociales adicionales como la aceptación por parte del propietario de la materia prima, el agotamiento del suelo, la competitividad con otros usos de la materia prima (como su uso directo e indirecto de alimento) pueden incluirse en el modelo propuesto de manera similar.

Estas correlaciones están formuladas adecuadamente para proporcionar un enfoque de optimización eficiente basado en un algoritmo genético y la programación lineal que optimizan simultáneamente la condición operativa en el ciclo de Rankine, el tipo de combustibles utilizados, la potencia producida y la satisfacción de la energía requerida por el proceso al costo mínimo anual, la contabilidad mínima de emisiones de gases de efecto invernadero y la maximización los trabajos generados. La siguiente sección presenta el enfoque de solución propuesto para el conjunto de relaciones del ciclo de Rankine.

SOLUCIÓN PROPUESTA PARA EL CICLO DE RANKINE

El enfoque de la solución se basa en el procedimiento que se muestra en la Fig. 5. Primero se proporciona la información sobre el calor requerido por el proceso, la presión en el condensador (para proporcionar esta energía), los límites superiores para el caudal, la temperatura y la presión en la turbina, así como la información de los combustibles considerados para hacer funcionar la caldera (es decir, costo unitario, unidad de EGEI y trabajos generados por unidad). Usando esta información, la temperatura de salida para el condensador se determina como líquido saturado y con la presión provista para el condensador usando la relación (14) y luego la entalpía para el líquido saturado a la salida del condensador se determina usando la relación (22). Usando la presión de la caldera dada por el algoritmo genético que es una de las variables de optimización de búsqueda, la temperatura de saturación se calcula con la relación (14), y la entalpía del líquido correspondiente se calcula con la ecuación (22); usando esta temperatura de saturación en las condiciones de presión de la caldera, se determina la entropía para la entrada de vapor a la turbina (usando la relación 15) así como la entalpía con la relación (16). La entalpía de salida de vapor saturado a la turbina se determina con relación (15). Luego, la eficiencia isentrópica para la turbina se determina usando las relaciones (20) - (22). Luego, los balances en la turbina se usan para determinar el caudal usando las relaciones (24) - (27). La temperatura para la salida de vapor a la turbina se determina a través de las relaciones (18) - (21). Luego se requiere el balance de energía de la caldera ecuación (4) para determinar la presión manométrica de la caldera (6) y los factores en la caldera ecuaciones (9, 10) para obtener el costo de la caldera, ecuación (8). Luego, los balances en la turbina se utilizan para determinar el trabajo del eje de la turbina, ecuación (7), el precio de la energía, ecuación (6) y el costo de la turbina, ecuación (5). Luego, se utiliza un modelo de programación lineal para determinar los combustibles utilizados a los costos mínimos para satisfacer la energía requerida en la caldera (considerando la eficiencia de cada combustible) y satisfacer el límite superior para las EGEI. Finalmente, en el costo total correspondiente, ecuación (13), se determinan las emisiones de gases de efecto invernadero, ecuación (28) y los empleos generados, ecuación (29).

Tenga en cuenta que cuando se necesita maximizar el número de trabajos, la generación de la curva de Pareto requiere la modificación del problema de programación lineal al reemplazar el límite superior para las EGEI con el límite inferior para los Trabajos generados.

CASO DE ESTUDIO

Considere la instalación de un procesamiento químico especializado que se muestra en la Fig. 6. Las tareas térmicas en el proceso implican el calentamiento de la corriente del producto del primer reactor (C1) y el producto inferior del sistema de acabado (C2), así como el enfriamiento para el segundo -reactor (H1) a 420 K y el producto final del sistema de acabado (H2) se enfría de 390 a 360. Los datos de la corriente se proporcionan en la Tabla 2. El proceso químico requiere 1,500 kW (o 5.1 MMBtu/h) a 100 psi. La temperatura y el caudal máximos para la turbina existente son 450 F y 25,000 l/h, respectivamente. La caldera tiene una eficiencia del 40% y la presión máxima permitida es 280 psi. Para evitar la condensación dentro de la turbina, se impone una restricción sobre la temperatura mínima de sobrecalentamiento a la salida de la turbina de 5 °F. El precio unitario de potencia se toma como 0.05 \$/kWh, y la eficiencia del generador se toma como 40%. Los datos unitarios para los combustibles se dan en la Tabla 3, la información de la unidad para los costos, EGEI y los trabajos generados para cada combustible se dan considerando el ciclo de vida completo del proceso y por unidad de Btu. De esta manera, el proceso de optimización se simplifica.

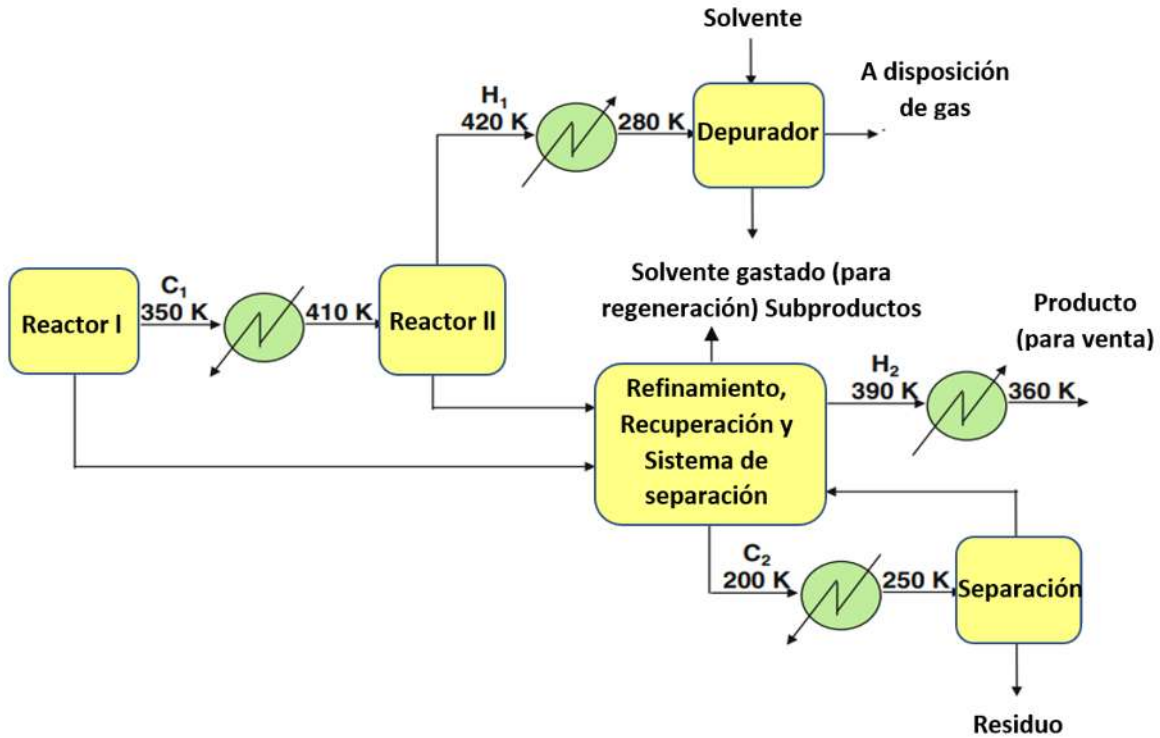


Figura 6 Diagrama de flujo simplificado para la instalación del procesamiento químico especializado

Tabla 2 Datos de corrientes para el procesamiento químico especializado

Corrientes	Flujo x calor específico (kW/K)	Suministro de Temperatura (K)	Temperatura Objetivo (K)	Cambio de Entalpia (kW)
H₁	20	420	280	-2800
H₂	30	390	360	-900
C₁	60	350	410	3600
C₂	10	200	200	500

7. SOLUCIÓN

En primer lugar, los objetivos mínimos de servicios públicos se identifican a través del análisis de punto térmico. La gran curva compuesta se desarrolla como se muestra en la Fig. 7 y los servicios mínimos de calentamiento y enfriamiento se determinan en 1,500 y 1,100 kW, respectivamente.

La utilidad de calentamiento se requiere a una temperatura desplazada de 415 K que corresponde a una temperatura de vapor de 420 K. La presión de saturación a esta temperatura es de 4.4 atm y el calor latente de condensación es de 2.123 kJ/kg.

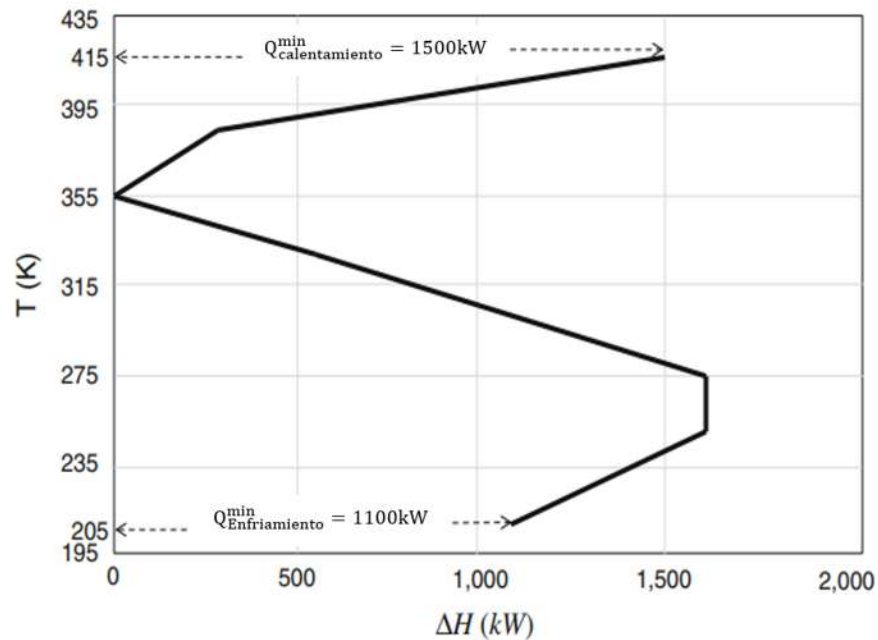


Figura 7 Gran curva compuesta para el estudio del caso presentado

Tabla 3 Datos de unidad para los combustibles del caso de estudio

Combustible	Costo por unidad (\$/MMBtu)	Unidad de eGEI (ton CO ₂ eq/Btu)	Eficiencia térmica de caldera (η_f)	Unidad de Trabajos (Trab/Btu)
Biomasa	1.92	$2.5776 \cdot 10^{-8}$	0.37	$0.0071 \cdot 10^{-12}$
Biogás	8.09	$2.8298 \cdot 10^{-8}$	0.41	$0.0554 \cdot 10^{-12}$
Madera Suave	2.4	$3.5327 \cdot 10^{-8}$	0.36	$0.0015 \cdot 10^{-12}$
Madera Dura	2.75	$3.5327 \cdot 10^{-8}$	0.36	$0.0057 \cdot 10^{-12}$
Biodiesel	29.68	$5.4154 \cdot 10^{-8}$	0.42	$0.2601 \cdot 10^{-12}$
Bioetanol	13.42	$6.1653 \cdot 10^{-8}$	0.42	$0.3033 \cdot 10^{-12}$
Carbón	1.47	$2.3354 \cdot 10^{-7}$	0.40	$0.1121 \cdot 10^{-13}$
Petróleo	17.29	$8.4975 \cdot 10^{-8}$	0.40	$0.1917 \cdot 10^{-13}$
Gas natural	5.53	$8.3444 \cdot 10^{-8}$	0.41	$0.0543 \cdot 10^{-13}$

Suponiendo que el vapor pierde principalmente su calor latente en el proceso de calentamiento y que la eficiencia de transferencia de calor es del 80%, el caudal de vapor requerido es de 3.180kg/h.

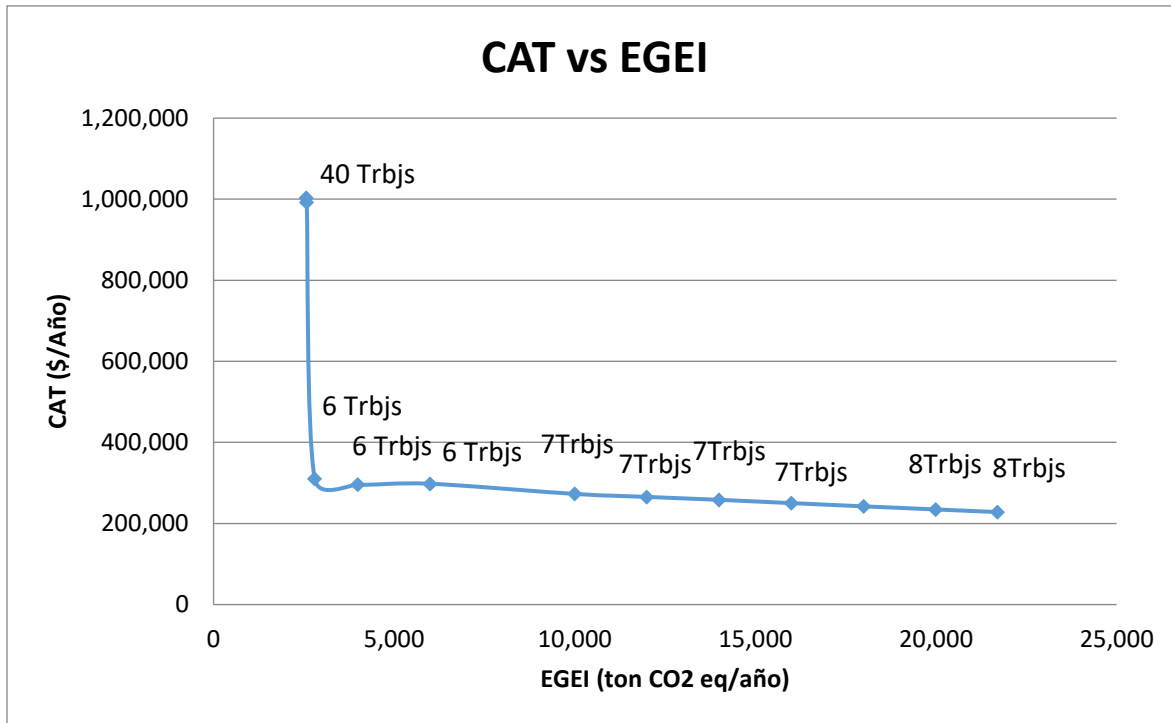


Figura 8 Solución Pareto para la minimización del CAT y la minimización de las EGEI

Luego, utilizando información de focalización previa, se implementa el enfoque de optimización basado en el algoritmo genético. Para la solución del problema abordado, se utilizó un número máximo de 100 generaciones en un tamaño de población de 100 individuos, el recuento de élite fue de 2 individuos y la fracción de cruce utilizada fue de 0.8. Este modelo se implementó en el software MATLAB, para usarse se proporcionó la rutina del algoritmo genético en una computadora con un procesador Intel i7 a 2.67 GHz con 8 GB de RAM, y el tiempo promedio de CPU consumido para la solución de cada punto de las curvas de Pareto fue de 1 minuto sin complicaciones numéricas.

Primero, el conjunto de soluciones de Pareto para minimizar el costo asociado para el sistema de cogeneración con respecto a minimizar las EGEI asociado se presenta en la Fig. 8, mientras que la Fig. 9 muestra los combustibles utilizados para hacer funcionar la caldera en cada caso presentado en las soluciones de Pareto de la Fig. 8, y la Tabla 4 muestra los principales resultados para el sistema de cogeneración. Observe en la Fig. 8 que los dos objetivos CAT y EGEI se contradicen entre sí, esto significa que las soluciones para el CAT

mínimo corresponden a las EGEI más alto en el conjunto de Pareto (que implica el uso de carbón como combustible), mientras que la solución para el mínimo EGEI corresponde al CAT más alto en el conjunto de Pareto (con el uso de biogás principalmente como combustible). Además, las soluciones que compensan estos dos objetivos (por ejemplo, los casos 5–7) implican el uso de diferentes combustibles como el carbón y la biomasa, estos proporcionan el CAT más bajo y las EGEI moderado. Además, observe en la Fig. 8 que los trabajos generados para el uso de diferentes combustibles tienen un gran impacto, el uso de biomasa tiene un impacto positivo para la generación de empleos, sin embargo, el impacto en la energía producida también es significativo porque la eficiencia cambia (observe que las condiciones en el sistema de cogeneración están optimizadas para cada punto de la curva de Pareto).

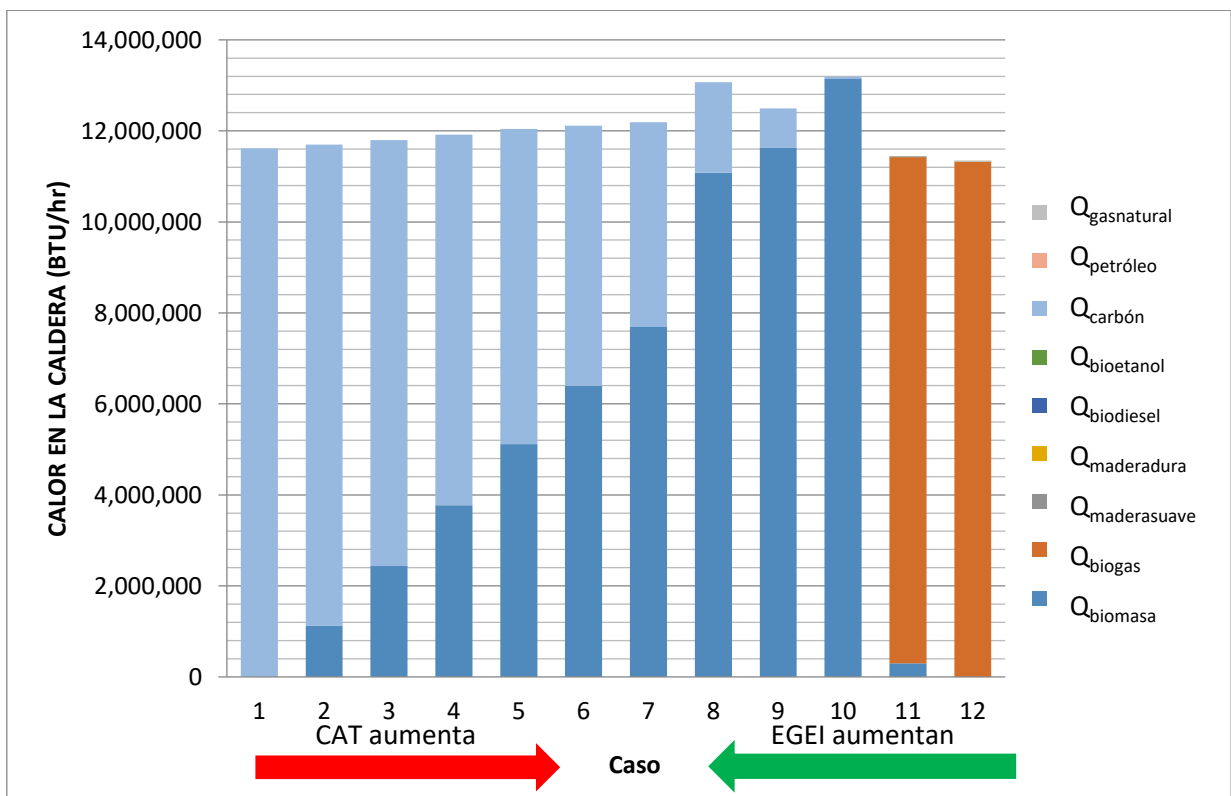


Figura 9 Combustibles usados para la solución óptima presentada en la Figura 8

Tabla 4 Soluciones óptimas para la curva Pareto del CAT vs las EGEI

Caso	P ₁ (psi)	T ₁ (°F)	Flecha de turbina (BTU/h)	CAT (\$/Año)
1	279	424	84,795	228,145
2	280	424	84,799	234,671
3	279	424	84,999	242,329
4	276	423	83,820	250,296
5	271	422	82,455	258,399
6	276	423	83,899	265,582
7	279	424	84,799	272,958
8	169	388	43,294	298,085
9	279	424	84,799	295,929
10	175	394	46,224	310,047
11	267	420	81,396	992,196
12	279	424	84,799	1,003,681

Además, la metodología propuesta se puede utilizar para identificar las compensaciones entre el CAT y los trabajos generados para el sistema de cogeneración; a este respecto, la figura 10 muestra la curva de Pareto para el CAT versus los trabajos generados, y la figura 11 muestra el tipo de combustible utilizado para los casos óptimos presentados en la figura 10. Primero, observe en la figura 10 que el CAT aumenta cuando aumenta el número de empleos; esta cifra se puede usar para determinar el costo de un número determinado de trabajos, por ejemplo, para generar 157 empleos, el CAT asociado es de \$ 2,899,913/año (Caso 8 de la Fig. 11); esto es, cada trabajo cuesta \$ 18,502/trabajo y el combustible utilizado son principalmente biocombustibles. Por otro lado, para obtener 6 empleos, el costo asociado es de \$ 298,085/año (Caso 1 de la Fig. 11), lo que significa que el costo unitario para cada trabajo es de \$ 46,130/trabajo (utilizando principalmente carbón y biomasa); Además, una solución intermedia (Caso 4 de la Fig. 11) que representa el uso de diferentes combustibles fósiles y biocombustibles tiene un costo unitario para el trabajo generado de \$ 25,058/trabajo. Finalmente, la metodología propuesta es útil para identificar el costo unitario para los

empleos generados, situación que se puede utilizar para que los gobiernos identifiquen los créditos tributarios necesarios para que el proceso sea atractivo tanto económica como socialmente, además de tener en cuenta los impactos ambientales para la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para tener en cuenta los impactos sociales adicionales, como la aceptación del propietario de la tierra de la materia prima, el agotamiento del suelo, la competitividad con otros usos de la materia prima (como su uso directo e indirecto como alimento) en el enfoque de la solución propuesta, después de la selección de una solución dada de la curva de Pareto, el tomador de decisiones puede obtener una medición de estos otros impactos sociales y determinar si esta solución es aceptada o no. Para los casos en que no se acepta la solución seleccionada, se debe seleccionar una solución diferente de la curva de Pareto, y el proceso se repite hasta que se cumplan los criterios dados.

Finalmente, sería atractivo mostrar gráficas tridimensionales para los tres objetivos considerados; sin embargo, esto no es posible porque se requieren muchos puntos para la vectorización y porque estos tres objetivos están interrelacionados y se requieren muchos puntos inviables para obtener la gráfica tridimensional.

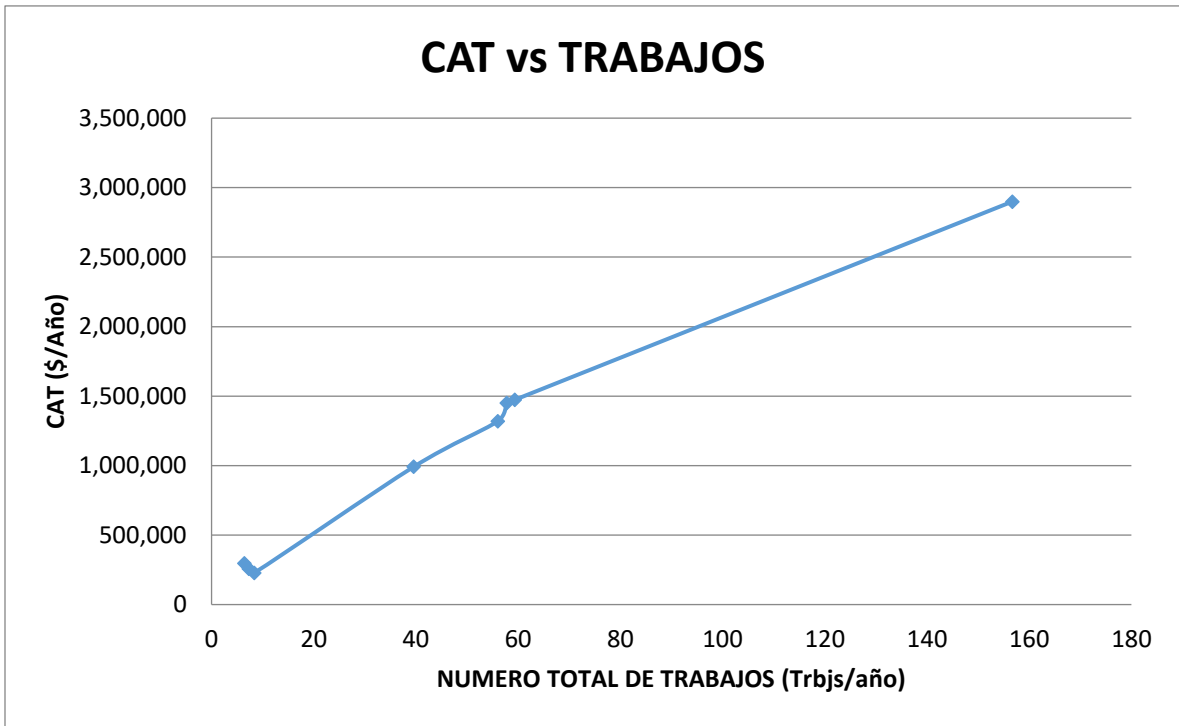


Figura 10 Solución Pareto para el CAT versus el número de trabajos para el caso de estudio

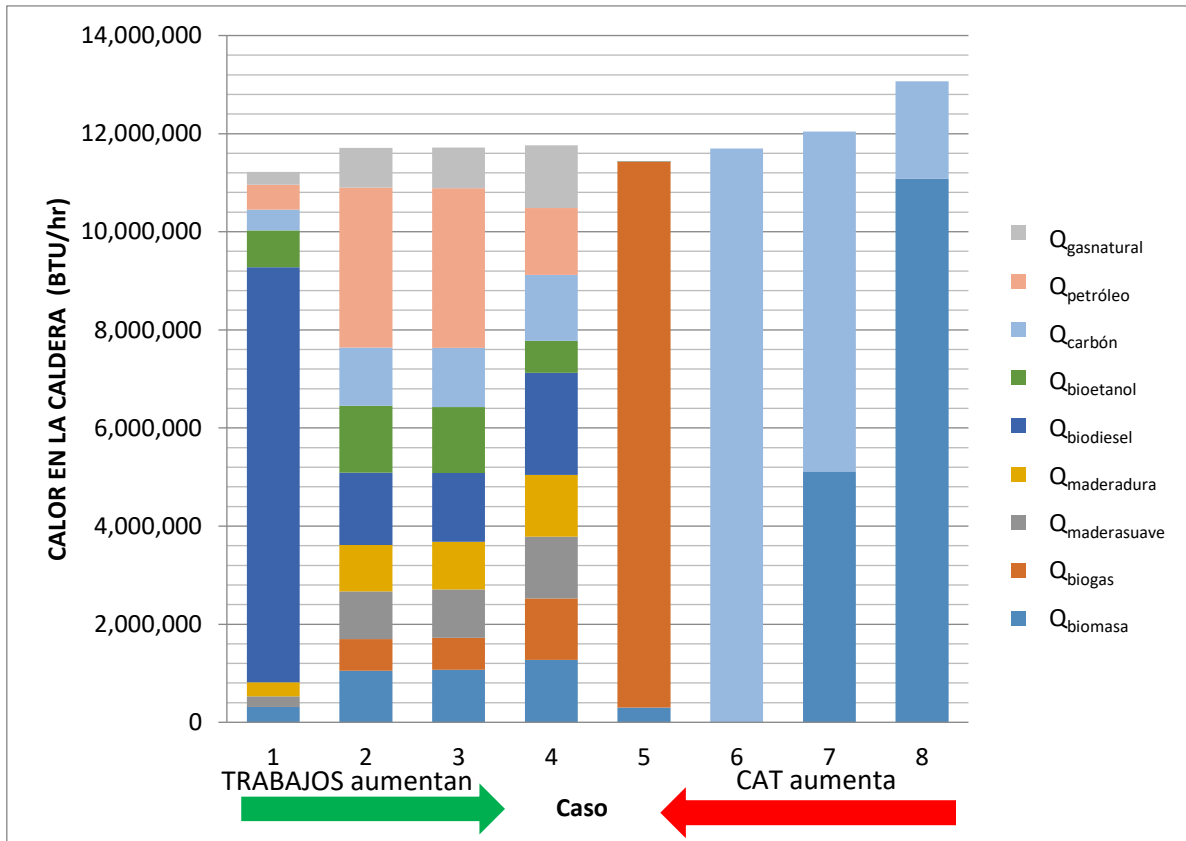


Figura 11 Combustibles usados para el caso óptimo presentado en la Figura 10

8. CONCLUSIÓN

Este trabajo ha introducido un enfoque de optimización de objetivos múltiples para diseñar sistemas de cogeneración a la vez que se consideran aspectos económicos, ambientales y sociales. La integración de procesos se ha utilizado como una plataforma organizativa para desarrollar el enfoque de diseño jerárquico. Se ha desarrollado un enfoque de optimización que utiliza un algoritmo genético que optimice el perfil de temperatura, el uso de servicios públicos, la selección de combustible, las condiciones del cabezal de vapor y las especificaciones de la turbina. Las compensaciones multi objetivo entre los aspectos económicos, ambientales y sociales se han estudiado mediante la generación de curvas de Pareto bajo diferentes objetivos. Un caso de estudio se resolvió para ilustrar la aplicabilidad del procedimiento propuesto.

9. NOMENCLATURA

A Constante para la relación de eficiencia en la turbina

a_0 Constante para la eficiencia de la turbina

a_1 Constante para la eficiencia de la turbina

a_2 Constante para la eficiencia de la turbina

a_3 Constante para la eficiencia de la turbina

a_e Precio de la energía eléctrica

a_f Costo unitario por combustible f

A_s Constante para la correlación de la temperatura de saturación

B Constante para la relación de eficiencia en la turbina

B_s Constante para la correlación de la temperatura de saturación

$C_{Caldera}$ Costo de la caldera

$Costo_a$ Costo del ventilador del aire de combustión

$Costo_b$ Costo de alcantarillado por purga de caldera

$Costo_d$ Costo de eliminación de cenizas

$Costo_e$ Costo del control de emisiones ambientales

$Costo_{BFW}$ Costo del tratamiento del agua de alimentación a la caldera

$Costo_{combustible}$ Costo de combustible

$Costo_g$ Costo de generación

$Costo_m$ Costo de mantenimiento de materiales y mano de obra

$Costo_p$ Costo de bombeo de agua de alimentación

$Costo_w$ Costo de suministro de agua cruda

$C_{Turbina}$ Costo para la turbina

fcP_v Caudal multiplicado por la capacidad calorífica para corriente de proceso fría v

FCP_u Caudal multiplicado por la capacidad calorífica para corriente de proceso caliente u

F_p Factor de flexibilidad para el incremento de la presión en la caldera

EGEI Emisión de gases de efecto invernadero

$egei_f$ Unidades de emisiones de gas de efecto invernadero por combustible f

h Entalpia

h_1 Entalpia del vapor en la entrada de la turbina
 h_{a2} Entalpia real del vapor en la salida de la turbina
 h_f Entalpia del fluido saturado
 h_{is2} Entalpia isentrópica de salida
 H_Y Horas por año que opera la planta
 TRABAJOS Trabajos generados totales
 $trabajos_f$ Unidad de trabajos por combustible f
 K_F Factor utilizado para anualizar los costos capitales
 m Flujo de vapor
 $M_{m\acute{a}x}$ Flujo máximo en la turbina
 N_C Número total de corrientes del proceso frías
 N_H Número total de corrientes del proceso calientes
 N_p Factor para contabilizar la presión de operación
 N_T Factor para contabilizar la temperatura de sobrecalentamiento
 P Presión
 P_e Precio de la energía eléctrica
 P_t Potencia de salida del eje de la turbina
 P_{g1} Presión manométrica de la caldera
 Q_c Carga de calor requerida en la caldera
 Q_f Carga de calor para combustión del combustible f suministrado a la caldera
 $Q_{proceso}$ Calor requerido para las corrientes de proceso
 S Entropía
 T Temperatura
 T_1 Temperatura de entrada a la turbina
 CAT Costo anual total
 T_{sat} Temperatura de saturación
 T_{sat1} Temperatura de saturación del vapor de entrada a la turbina
 T_{sat2} Temperatura de saturación para el vapor a alta presión
 T_{sh} Temperatura de sobrecalentamiento
 T^s_v Temperatura suministrada para la corriente de proceso fría v
 T^s_u Temperatura suministrada para la corriente de proceso caliente u

T_v^t Temperatura objetivo para la corriente de proceso fría v
 T_u^t Temperatura objetivo para la corriente de proceso caliente u
u Corrientes de proceso calientes
v Corrientes de proceso frías
W Trabajo

SÍMBOLOS GRIEGOS

Δh_{is} Diferencia de entalpia isentrópica en la turbina
 η_f Eficiencia en la caldera por combustible f
 η_g Eficiencia del generador
 η_{js} Eficiencia isentrópica para la turbina
 η_{js} Eficiencia máxima en la turbina
 $\eta_{turbina}$ Eficiencia de la turbina

10. REFERENCIAS

- Abdelhady F, Bamufleh H, El-Halwagi MM, Ponce JM (2015) Optimal design and integration of solar thermal collection, storage, and dispatch with process cogeneration systems.
- Al-Azri N, Al-Thubaiti M, El-Halwagi MM (2009) An algorithmic approach to the optimization of process cogeneration. *Clean Technol Environ Policy* 11(3):329–338
- Al-Sulaiman FA, Jamdullaphur F, Dincer I (2010) Trigeration: a comprehensive review based on prime movers. *Int J Energy Res* 35(3):233–258
- Branan C (2002) Rules of thumb for chemical engineers. Gulf Professional Publishing, Houston.
- Centrales terminacas de ciclo combinado. (s.f.). Obtenido de <http://www.cicloscombinados.com/index.php/el-ciclo-rankine>
- Dhole VR, Linnhoff B (1992) Total site targets for fuel, cogeneration, emissions, and cooling. *Comput Chem Eng* 17 S101–S109
- El-Halwagi MM (1997) Pollution prevention through process integration: systematic design tools. Academic Press, San Diego.
- El-Halwagi MM (2006) Process integration. Elsevier, Amsterdam.
- El-Halwagi MM (2012) Sustainable design through process integration: fundamentals and applications to industrial pollution prevention, resource conservation, and profitability enhancement. Butterworth-Heinemann, London.
- El-Halwagi MM, Harell D, Spriggs HD (2009) Targeting cogeneration and waste utilization through process integration. *Appl Energy* 86(6):880–887
- Fernández F, Lamas W de Q, Gabriel Adam G (2018) Computational tools and operational research for optimal design of co-generation systems.

- Foo DCY (2009) State-of-the-art review of pinch analysis techniques for water network synthesis. *Ind Eng Chem Res* 48(11): 5125–5159
- G.S. Krishna Priya, Santanu Bandyopadhyay (2017) Multiple objectives Pinch Analysis.
- Hipólito BJ, JM Ponce, Lira LF, Serna M, El-Halwagi MM (2014) Multi objective design of interplant trigeneration systems.
- IMPLAN (2018) Minnesota IMPLAN group. <http://www.implan.com/>. Accessed May 2020
- JEDI (2017) Job and economic development impact model. <http://www.nrel.gov/analysis/jedi/>. Accessed May 2020
- Kamrava S, Kerron JG, El-Halwagi MM, Eljack FT (2015) Managing abnormal operation through process integration and cogeneration systems.
- Kemp I (2009) Pinch analysis and process integration—a user guide on process integration for the efficient use of energy, 2nd edn. Butterworth-Heinemann, Amsterdam
- Klemes J, Dhole VR, Raissi K, Perry SJ, Puigjaner L (1997) Targeting and design methodology for reduction of fuel, power, and CO₂ on total sites. *Appl Therm Eng* 17(8–10):993–1003
- Kumana J (2003) How to calculate the true cost of steam, DOE/GO-102003-1736. US Department of Energy, Washington
- Lira LF, Gutiérrez CG, Bamufleh H, Abdelhady F, Ponce JM, Serna M, El-Halwagi MM (2015) Reduction of greenhouse gas emissions from steam power plants through optimal integration with algae and cogeneration systems.
- Mahmud R, Harell D, El-Halwagi MM (2012) A process integration framework for the optimal design of combined heat and power systems in the process industries, chapter 14. In: Foo DCY, El-Halwagi MM, Tan RR (eds) Recent advances in sustainable process design and optimization. *Advances in process systems engineering*. World Scientific Publishing Company, London
- Majozi T (2010) Batch chemical process integration: analysis, synthesis, and optimization. Springer, Heidelberg

- Mavromatis SP (1996) Conceptual design and operation of industrial steam turbine networks, Ph.D. Thesis, University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester
- Mavromatis SP, Kokossis AC (1998) Conceptual optimization of utility networks for operational variation-I targets and level optimization. *Chem Eng Sci* 53(8):1585–1608
- Miller RE, Blair PD (2009) *Input-output analysis: foundations and extensions*. Cambridge University Press, Cambridge
- Mohan T, El-Halwagi MM (2007) An algebraic targeting approach for effective utilization of biomass in cogeneration systems through process integration. *Clean Technol Environ Policy* 9(1):13–25
- MORAN, J. A. (1994). *Meteorology: The atmosphere and the science of weather*. Obtenido de <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/GasesEfect.htm>
- Ng RTL, Loo JSW, Ng DKS, Foo DCY, Kim J-K, Tan RR (2017) Targeting for cogeneration potential and steam allocation for steam distribution network.
- Noureldin MB (2012) *Pinch technology and beyond: new vistas on energy efficiency optimization*. Nova Science Publishers, New York
- Ponce JM, Fuentes LF, Nápoles F, Serna M, El-Halwagi MM (2014) Optimal design of integrated CHP systems for housing complexes.
- Ponce JM, Gutiérrez CG, Serna M, El-Halwagi MM (2013) Multi-objective optimization of steam power plants for sustainable generation of electricity.
- Raissi K (1994) *Total site integration*. Ph.D. Thesis, University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, UK
- Rossiter AP (2010) Improve energy efficiency via heat integration. *Chem Eng Prog* 106(12):33–42

- Shankar A, Subramanian R, Gundersen T, Adams TA II (2018) Modeling and Simulation of Energy Systems: A Review.
- Smith R (2005) Chemical process design and integration. Wiley, New York
- Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) (2007) Climate change: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, New York
- Tora EA, El-Halwagi MM (2011) Integrated conceptual design of solar-assisted trigeneration systems. *Comput Chem Eng* 35(9): 1807–1814
- Ubando A, Culaba A, Aviso KB, Tan RR (2013) Simultaneous carbon footprint allocation and design of trigeneration plants using fuzzy fractional programming.
- Varbanov PS, Doyle S, Smith R (2004) Modelling and optimization of utility systems. *Chem Eng Res Des* 76(3):239–245
- Wu DW, Wang RZ (2006) Combined cooling, heating and power: a review. *Prog Energy Combust Sci* 32(5–6):459–495
- You F, Tao L, Graziano DJ, Snyder SW (2012) Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis. *AIChE J* 58(4):1157–1180
- Zhou H, Qian Y, Kraslawski A, Yang Q, Yang S (2017) Life-cycle assessment of alternative liquid fuels production in China.