



## **ANÁLISIS COMPARATIVO DE COMBUSTIBLES PARA OPTIMIZAR LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE UN CICLO RANKINE REGENERATIVO**

Carlos Antonio Padilla-Esquivel <sup>a</sup>, Luis Germán Hernández-Pérez <sup>a,\*</sup>, José María Ponce-Ortega <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, 58060, México. 0500305D@umich.mx

### **Resumen**

Se propone un esquema computacional para la optimización de un ciclo de generación de energía eléctrica a partir de distintos combustibles mediante técnicas metaheurísticas. Se desarrolló una optimización multiobjetivo económica y ambiental donde se implementa una herramienta metaheurística para abordar este problema. Los datos de simulación del proceso se obtienen mediante el software Aspen Plus®. La herramienta de optimización para el análisis de este trabajo consiste en un algoritmo metaheurístico llamado Improve Multi-Objective Differential Evolution (I-MODE), de tal forma que se generará una subrutina de enlace mediante la tecnología Component Object Module (COM) y desarrollada en scripts de Microsoft™ Excel Visual Basic para Aplicaciones (VBA) para controlar el simulador comercial Aspen Plus® para las variables de decisión en el proceso.

*Palabras clave:* Simulación de procesos; ciclo de generación de energía eléctrica; optimización multiobjetivo; algoritmos metaheurísticos; análisis de distintos combustibles.

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF FUELS TO OPTIMIZE THE GENERATION OF ELECTRICITY THROUGH A REGENERATIVE RANKINE CYCLE**

### **Abstract**

Using metaheuristic techniques, a computational scheme is proposed for the optimization of an electric power generation cycle from different fuels. An economic and environmental multi- objective optimization was developed where a metaheuristic tool is implemented to address this problem. Process simulation data is obtained using Aspen Plus® software. The optimization tool for the analysis of this work consists of a metaheuristic algorithm called Improve Multi-Objective Differential Evolution (I-MODE), in such a way that a link subroutine will be generated using the Component Object Module (COM) technology and



developed in Microsoft™ Excel Visual Basic for Applications (VBA) scripts to control the Aspen Plus® business simulator for decision variables in the process.

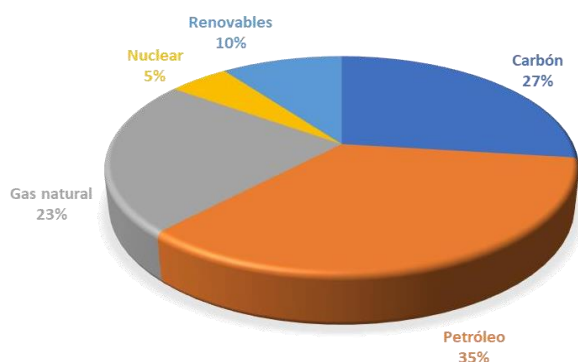
*Keywords:* Process simulation; electric power generation cycle; multi-objective optimization; metaheuristic algorithms; analysis of different fuels.



## 1. Introducción

Durante los últimos años ha existido un gran interés en la conservación de los recursos naturales, la reducción de energía y las emisiones asociadas (Santibañez-Aguilar et al., 2011). La creciente demanda de energía, el agotamiento de las fuentes de energía fósil y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) constituyen algunos de los desafíos más serios para el desarrollo sostenible en todo el mundo (Hisham et al., 2013). La fuente principal de energía se encuentra en el sol que nos proporciona luz y calor. El resto se encuentra en la atmósfera, sobre la superficie terrestre o en el interior del planeta. Esta energía puede ser renovable o no renovable, dentro de esta última encontramos a los combustibles fósiles, tales como: el petróleo, carbón mineral y el shale gas, los cuales son recursos limitados (Castro-Martínez et al., 2012). Para satisfacer la creciente demanda mundial de electricidad, las proyecciones indican que los combustibles fósiles, especialmente el carbón y el gas natural, seguirán siendo componentes críticos del suministro mundial de electricidad al menos durante las próximas décadas (Gutiérrez- Arriaga et al., 2013). Hoy en día cerca del 83% de la energía primaria comercial consumida en el mundo procede de

combustibles fósiles. Las energías renovables suministran el 5.5% del total y la nuclear el 11.5% (Çengel y Boles, 2015).



**Figura 1.** Porcentajes del consumo total de energía a nivel mundial por tipo de combustible.

Es más que claro que durante un largo periodo de tiempo no podremos disponer de petróleo, gas y carbón. Pocos dudan ya del potencial del crecimiento de las energías renovables en los países industrializados. Sin embargo, se estima que hacia 2030 los combustibles fósiles todavía representarán más del 80% de la energía primaria que el mundo consumirá. Esta cifra podría descender al 55% en 2060, pero el porcentaje se refiere a un consumo total de energía que podría ser dos veces al actual (Dincer y Al-Muslim, 2001). En la actualidad, las centrales eléctricas convencionales alimentadas de combustibles fósiles son y seguirán siendo la forma dominante en generar electricidad en el



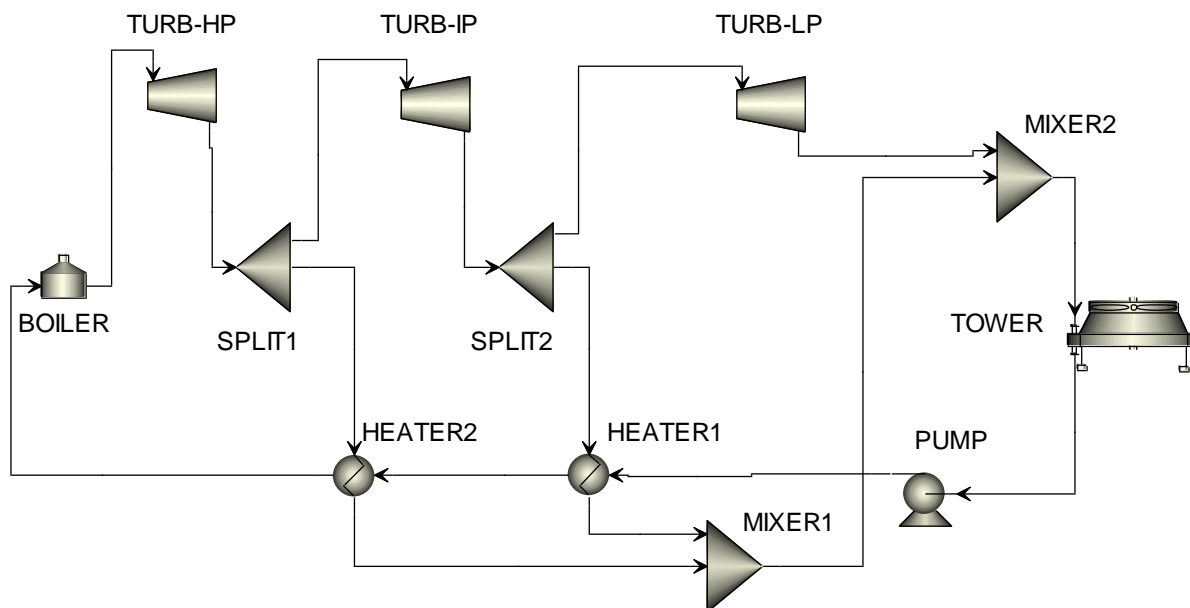
mundo (Gutiérrez-Arriaga et al., 2012). De hecho, más del 65% de la electricidad mundial se genera a partir de sistemas de energía de combustibles fósiles (IEA, 2008). Por lo tanto, no hay duda de que los combustibles fósiles contribuyen enormemente al alto nivel de vida que es posible gracias al fácil acceso a la electricidad. La situación energética actual debe ser planteada como una crisis global, y se necesita encontrar alternativas sostenibles para asegurar el futuro de la población. La preocupación de la crisis energética mundial por el agotamiento de combustibles fósiles, los contaminantes y las emisiones de gases

puede resolverse por dos métodos (Çengel y Boles, 2015):

1. Utilizando recursos energéticos renovables para reemplazar combustibles fósiles.
2. Implementando prácticas energéticas eficientes en todos los aspectos de la producción, distribución y consumo de manera que se utilice menos combustible mientras se obtiene la misma producción útil.

## 2. Simulación de procesos

El primer paso se retribuye a la simulación de proceso que se basa en configurar los equipos



**Figura 2.** Diagrama de proceso en Aspen Plus® para planta de energía del Ciclo Rankine Regenerativo.



y conexiones de las corrientes que relacionen las unidades bajo las condiciones específicas de cada una que permita ofrecer una representación del proceso. Para ello se empleó el simulador de procesos Aspen Plus®, en la Figura 2 se muestra el modelo del diagrama de flujo de proceso elaborado para la planta de generación de potencia de vapor simple basada en el ciclo Rankine regenerativo con los siguientes equipos: una caldera, turbinas turbina de alta presión (HP), turbina de presión intermedia (IP) y turbina de baja presión (LP), una bomba de agua de alimentación, dos precalentadores de agua de alimentación y una torre de enfriamiento como condensador. Para la simulación se utilizaron los siguientes valores: temperatura de 580 °C, presión de 38 atm y un caudal total de 100 ton/día para la corriente de salida de la caldera. La temperatura de salida de la corriente caliente en el condensador es igual a 100 °C, la temperatura de la corriente disminuye a 10 °C en el primer precalentador y 100 °C en la segunda, presión de la bomba 40 atm, temperatura de 600 °C y presión de 40 atm en la caldera, la fracción dividida es de 0.8 en ambos divisores y las disminuciones de presión son 20 atm para la turbina Hp, 10 atm para la turbina IP y 5 atm para la turbina LP (Ponce- Ortega y Hernández-Pérez, 2019).

### 3. Algoritmo de optimización

Sharma y Rangaiah (2013) desarrollaron un algoritmo de evolución diferencial multiobjetivo mejorado (I-MODE) con un criterio de terminación para optimizar los procesos químicos. El criterio de terminación trabaja utilizando las soluciones no dominadas obtenidas como el proceso de búsqueda a través de la adaptación y mejora de DETL (Evolución diferencial con lista tabú) para resolver restricciones de optimización multiobjetivo.

Para la solución del problema de optimización se seleccionaron ocho variables de decisión e introdujeron para cada una un valor inferior y superior. Los valores de las variables de decisión seleccionadas se describen a continuación para los límites superior e inferior: en la temperatura de la caldera de 580 °C a 620 °C, para la presión de la caldera de 35 atm a 45 atm, para la disminución de la presión la turbina HP de 25 atm a 15 atm, para la disminución de la presión en la turbina IP de 15 atm a 5 atm, para la disminución de la presión de la turbina LP de 8 atm a 2 atm, para la presión de la bomba 35 atm a 45 atm y para la fracción dividida en ambos divisores 0.5 a 1.0. Todas las variables de decisión se seleccionaron como

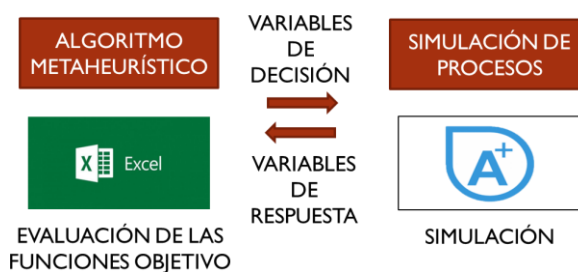


variables continuas y el valor inicial para cada una fue la mitad entre el valor mínimo y el máximo posible. La optimización se desarrolló sin ninguna restricción de desigualdad. Los valores de los parámetros asociados al algoritmo I-MODE utilizado son los siguientes: Tamaño de población (NP) de 100 individuos, Número de generaciones (GenMax) de 100, Taboo list size (TLS) de 50 individuos, Taboo Radius (TR) de 0.01, Fracciones de cruce (Cr) de 0.8 y Fracciones de mutación (F) de 0.5 (Hernández-Pérez et al., 2019).

#### 4. Enlace entre programas

Para realizar en el enlace es necesario contar con dos archivos. El primero, es el archivo de respaldo del simulador de Aspen Plus® corresponde a los datos de la simulación de procesos elaborada previamente. Existe gran variedad de simuladores de procesos en el mercado, pero diversos trabajos han demostrado que el simulador de Aspen Plus® es el más eficiente dado que la eficiencia de sus componentes y es ampliamente utilizado para el desarrollo de trabajos de investigación y en la industria de procesos químicos (Morgan et al., 2017; Tang et al., 2017; Pauls et al., 2016). Aspen Plus® tiene disponibles unidades de proceso comunes y base de datos

de propiedades para numerosas especies químicas. El segundo, es el archivo que proviene del programa Microsoft™ Excel, que incluirá una rutina que llamará a las variables del simulador, colocando valores de entrada y leyendo las variables de respuesta. Para este enlace directo no se necesita de ningún otro programa optimizador ya que el algoritmo de optimización estocástico se encuentra dentro del programa enlazador Microsoft™ Excel.

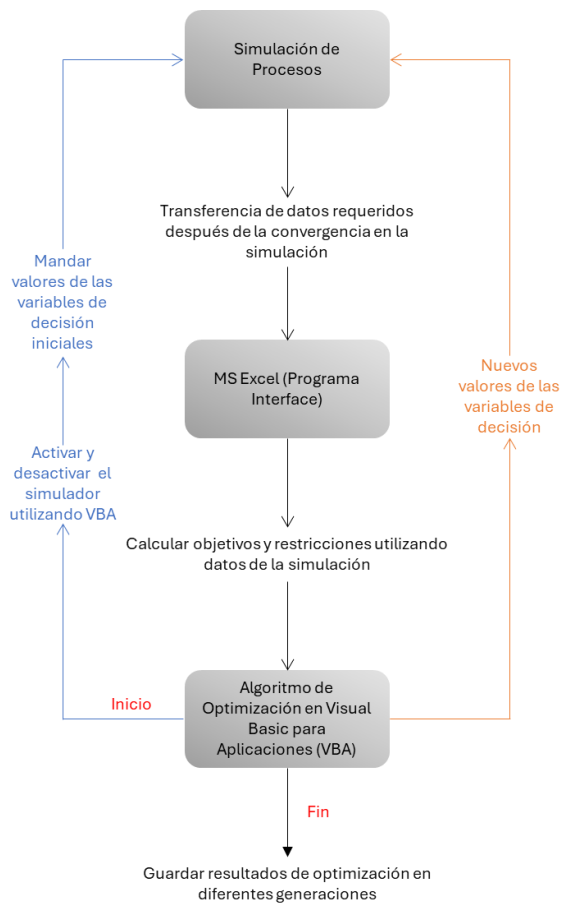


**Figura 3.** Archivos para realizar el enlace entre programas.

Durante el proceso de optimización, se envía un vector de variables de decisión de diseño de Microsoft™ Excel al software simulador Aspen Plus®, en este simulador de procesos se obtienen cálculos rigurosos para los datos que identifican un diseño de procesos particular (por ejemplo, temperatura y presión en la caldera, fracción dividida en el divisor, etc.) a través de la resolución de los equilibrios de fase junto con el conjunto completo de balances de masa y energía. Estos datos se devuelven desde el software simulador Aspen



Plus® a Microsoft™ Excel para el cálculo de las funciones objetivo, los valores obtenidos para funciones objetivo se evalúan y se generan nuevos vectores de variables de diseño de acuerdo con el procedimiento estocástico de este método.



**Figura 3.** Secuencia del simulador, Microsoft™ Excel y el algoritmo VBA.

## 5. Resultados

Para este caso, en la Figura 5 podemos observar los siguientes puntos importantes A, B, C, D y E. Para el punto A tenemos lo

valores mínimos de las emisiones de CO<sub>2</sub> con 29,786 ton/año y para el beneficio anual con 5.40 MMUSD/año, siendo estos los valores mínimos. Para el punto B, C y D las emisiones de CO<sub>2</sub> tiene un valor de 124,727 ton/año, 217,149 ton/año y 245,491 ton/año, y para el beneficio anual 22.38 USD/año, 33.51 MMUSD/año y 56.62 MMUSD/año siendo estos puntos las soluciones optimas. Para el punto E, tenemos los valores máximos de las emisiones de CO<sub>2</sub> con 234,491 ton/año y para el beneficio anual con 72.51 MMUSD/año. Finalmente, concluimos que el punto E es la solución factible al ofrecer los mejores valores. El punto B es una solución atractiva al igual que el punto que tiene los valores máximos de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el beneficio anual, pero al tener un incremento considerable en comparación con el punto C no pueden ser consideradas como soluciones factibles esto debido a que no se considera ninguna restricción o función de penalización en el algoritmo como criterio de selección de datos para la combinación de las variables de decisión, existen diversos valores obtenidos en las funciones objetivo que no son los esperados en el simulador de procesos. Finalmente, lo que se consideró con base a este análisis es descartar dichos valores que son inferiores a los que se obtienen como



valores iniciales de las variables de decisión con el fin de obtener soluciones factibles.

conocimiento en el campo de la generación de energía eléctrica. Por medio del presente

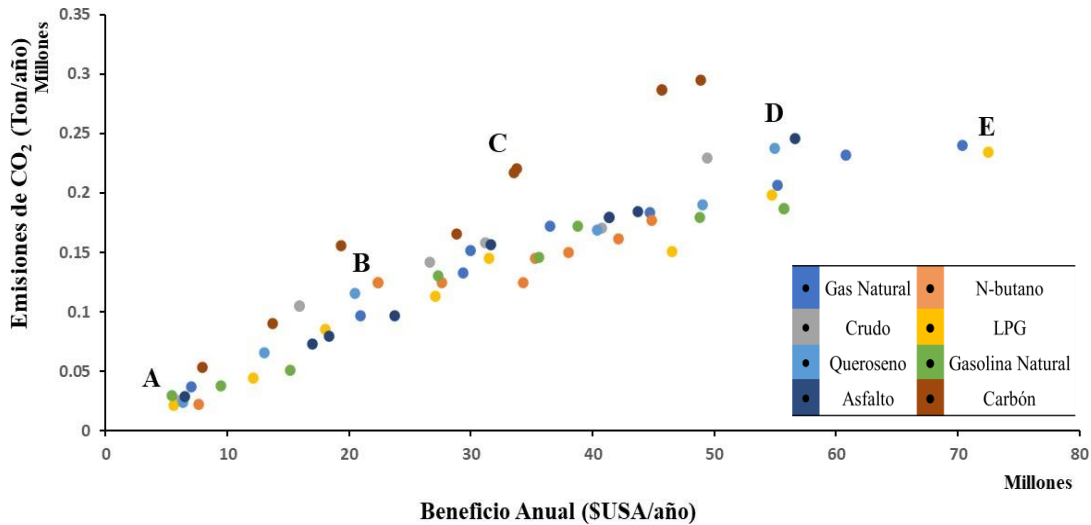


Figura 4. Resultados obtenidos para cada combustible.

Tabla 1. Condiciones de operación de los puntos óptimos.

|                               | Gasolina natural | N-butano | Carbón   | Asfalto  | LPG      |
|-------------------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|
| Temperatura de la caldera, °C | 603.4202         | 613.2599 | 580.3419 | 617.7172 | 617.2304 |
| Presión de la caldera, atm    | 36.4757          | 36.6057  | 36.5512  | 37.4473  | 37.0275  |
| Presión de la turbina HP, atm | 24.1244          | 16.9126  | 24.2510  | 23.2755  | 20.7910  |
| Presión de la turbina IP, atm | 7.7560           | 14.4899  | 11.7289  | 13.6286  | 11.9507  |
| Presión de la turbina LP, atm | 4.0639           | 4.4883   | 4.6757   | 4.5600   | 4.0821   |
| Presión de la bomba, atm      | 41.1028          | 42.9189  | 40.8518  | 43.7371  | 37.2469  |
| Fracción del divisor 1        | 0.6476           | 0.6071   | 0.7148   | 0.9770   | 0.9874   |
| Fracción del divisor 2        | 0.5491           | 0.8179   | 0.8289   | 0.7891   | 0.8909   |

## 6. Conclusiones

El presente trabajo tiene como objeto principal contribuir al avance del

estudio, se busca arrojar información contundente en la elección de combustibles en la operación del ciclo Rankine regenerativo con ayuda de herramientas de





optimización que pueda ofrecer mejoras significativas en la eficiencia ya que esto implica en los aspectos económicos y ambientales.

Para el análisis del gráfico de Pareto se utilizó el criterio de la última generación, tomando en consideración cinco puntos de los diez que el algoritmo arroja, esto para considerar los puntos iniciales donde se muestran los valores mínimos, valores intermedios para observar el incremento entre los mismos y los valores finales donde se encuentran los máximos, estos puntos son el resultado de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el beneficio anual. El punto E es la mejor alternativa siendo el LPG el combustible óptimo teniendo un valor para las emisiones de CO<sub>2</sub> de 234,113.3 ton/año y para el beneficio anual de 72.51 MMUSD/año. Los valores óptimos para el punto E son los siguientes: 617.23 °C para la temperatura de operación de la caldera, 37.02 atm para la presión de la caldera, 20.79 atm para la disminución de la presión de la turbina HP, 11.95 atm para la disminución de presión en la turbina IP, 4.08 atm para la disminución de presión en la turbina LP, 37.24 atm para la presión de la bomba y 0.98 y 0.89 para la fracción dividida en el primer y en el segundo divisor, respectivamente. El algoritmo estocástico I-MODE demostró ser una

alternativa eficiente para solución de problemas complejos de optimización de procesos químicos.

Las diferencias varían en las condiciones de operación y así mismo en las funciones objetivo que son el impacto ambiental y el beneficio anual, estos hallazgos pueden ser de gran utilidad en la toma de decisiones en la selección de combustibles, en la dirección del beneficio anual los resultados óptimos reflejan una mejora eficiencia económica produciendo una mayor cantidad de energía y para la dirección del impacto ambiental lo que se busca es reducir las emisiones dióxido de carbono, lo que es fundamental para la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático.

### Referencias bibliográficas

- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill.
- Gutiérrez-Arriaga, C. G., Serna-González, M. & Ponce-Ortega, J. M. (2013). Multi-objective optimization of steam power plants for sustainable generation of electricity. *Clean Technologies Environmental Policy*. 15(1), 551-566. <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0556-4>



Hernández-Pérez, L. G, Lira-Barragán, L. F. & Ponce-Ortega, J. M. (2020). Hybrid multiobjective optimization using deterministic and metaheuristic techniques for flowback water reusing in hydraulic fracturing processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(34), 15298–15308.

<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c02867>

Hernández-Pérez, L. G., Ramírez-Márquez, C., Segovia-Hernández, J. G. & Ponce-Ortega, J. M. (2020). Simultaneous structural and operating optimization of process flowsheets combining process simulators and metaheuristic techniques: The case of solar-grade silicon process. *Computers & Chemical Engineering*, 140, 106946. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106946>

Hernández-Pérez, L. G., Sánchez-Tuirán, E., Ojeda, K. A., El-Halwagi, M. M. & Ponce-Ortega, J. M. (2019). Optimization of Microalgae-to-Biodiesel Production Process Using a Metaheuristic. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 7 (9), 8490-8498. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00274>

Ponce-Ortega, J. M. & Hernández-Pérez, L. G., (2019). *Optimization of Process Flowsheets through Metaheuristic Techniques*. Springer: Switzerland.

Sharma, S. & Rangaiah, G. P. (2013). An improved multi-objective differential evolution with a termination criterion for optimizing chemical processes. *Computers & Chemical Engineering*. 56(1), 155-173. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.05.004>