ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL CICLO TERMODINÁMICO ORGÁNICO DE RANKINE MEDIANTE CIENCIA DE DATOS: UNA REVISIÓN DOCUMENTAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

DANIEL SANTIAGO RICO SALAMANCA

Monografia de Compilación presentada al Programa de Física
como requisito para optar por el título de Físico.

Director: Ph.D Alfredo Blanco Serrano

Departamento de Física
Facultad de Ciencias Básicas



Junio 2025

Resumen

En esta monografía de recopilación se aborda el problema de la conversión eficiente de fuentes de calor residual y de baja temperatura en energía eléctrica, mediante el análisis de varios artículos científicos que estudian, desde diferentes enfoques, el Ciclo Orgánico de Rankine (ORC), una tecnología con alto potencial en el contexto de la sostenibilidad energética. Para ello, se realiza una revisión cronológica de cinco investigaciones que destacan por su aplicación de técnicas avanzadas de análisis de datos, las cuales han permitido mejoras significativas en la eficiencia térmica, la viabilidad económica y el diseño de sistemas ORC. Los estudios analizados integran metodologías como algoritmos evolutivos, modelado molecular, simulaciones computacionales y análisis de patentes, que favorecen una optimización precisa en la selección de fluidos de trabajo y en la configuración de los componentes del ciclo. A pesar de los avances, se reconocen algunas limitaciones como los costos de implementación, la complejidad en la integración con fuentes renovables y la necesidad de mejores fluidos. No obstante, los resultados evidencian que la articulación entre la termodinámica y la ciencia de datos constituye una vía sólida para el desarrollo y adopción a gran escala de esta tecnología en el marco de un sistema energético más eficiente y limpio. Finalmente, la revisión cronológica de los artículos permite evidenciar el proceso de optimización progresiva en la aplicación del ORC, consolidándolo como una solución viable y adaptable para diversas industrias en la actualidad.

Palabras Clave: Análisis de Datos, Ciclo Orgánico de Rankine, Eficiencia, Optimización.

Tabla de contenido

Pag.

Resumen I

TABLA DE CONTENIDO II

1. Introducción 1

2. Enfoque 4

2.1 Planteamiento del Problema: 4
2.2 Pregunta Monográfica: 5
2.3 Objetivos De La Monografía de Recopilación: 6
2.3.1 Objetivo General: 6
2.3.2 Objetivos Específicos: 6

3. Fundamentos del Ciclo Orgánico de Rankine 7

4. Compilación Documental 14

4.1 Ciclo de Rankine impulsado por calor de baja calidad: un estudio de viabilidad (2008). 14
4.2 Aplicaciones del Sistema del Ciclo orgánico de Rankine (ORC) para la Energía Solar: Avances Tecnológicos Recientes (2019). 18
4.3 Optimización de Ciclos Orgánicos de Rankine para la Recuperación de Calor Residual en Plantas de Producción de Aluminio (2019) 24
4.4 Predicción del Rendimiento y Diseño Activo del Fluido de Trabajo del Ciclo Orgánico de Rankine Basado en la Estructura Molecular (2022) 30
4.5 Optimización Multiobjetivo de un Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) para una Planta Híbrida de Energía Solar y de Residuos (2024): 36

5. Conclusiones 43

6. Recomendaciones 45

6.1 Desafíos 45
6.1.1 Dependencia de los Combustibles Fósiles 45
6.1.2 Diseño de Intercambiador de Calor 45
6.1.3 Barreras Tecnológicas 45
6.2 Oportunidades 46

6.2.1 Integración De Energías Renovables 46
6.2.2 Investigaciones y Desarrollos Innovadores 46
6.2.3 Beneficios Económicos y Ambientales 46

Referencias 48

1. Introducción

William John Macquorn Rankine (1820-1872), ingeniero y físico escocés, fue una figura clave en la fundación de la termodinámica junto a Rudolf Clausius (1822-1888) y William Thomson (1824-1907) [1]. De los tres, Rankine es reconocido por desarrollar un ciclo termodinámico idealizado a presión constante que incluye cambios de fase, generalmente del agua, para convertir calor en trabajo mediante una turbina. Este ciclo es similar al ciclo de Carnot [2], pero se diferencia por ofrecer una menor eficiencia[1]. No obstente, su diseño permite una gran versatilidad en aplicaciones industriales complementando la generación de energía. Este ciclo, ampliamente utilizado en plantas de energía y sistemas de generación eléctrica [4], también describe el funcionamiento de turbinas de vapor y motores alternativos como las locomotoras de vapor [5].

El Ciclo Orgánico de Rankine (ORC[2]) es una tecnología de generación de energía que emplea fluidos orgánicos[3] en lugar de agua para transformar el calor en trabajo mecánico, el cual posteriormente se utiliza para la generación de electricidad [7]. Este ciclo es especialmente eficaz para utilizar fuentes de calor de baja temperatura[4], como la energía solar [9], la geotérmica [10] y el calor residual industrial [11]. En general, el ORC es un proceso en el que un fluido orgánico de trabajo se vaporiza, se expande en una turbina, se condensa y es bombeado nuevamente a un evaporador para reiniciar el ciclo [12].

Cada año, las técnicas de optimización energética, de fabricación y de costos en el ORC se perfeccionan continuamente gracias a los avances en investigación y

[1] La eficiencia termodinámica es una medida adimensional del rendimiento de un dispositivo que utiliza energía térmica. En el caso del ciclo de Carnot y Rankine, la eficiencia térmica es la relación entre el trabajo neto de salida y el calor de entrada [3].

[2] Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) de sus siglas en inglés: Organic Rankine Cycle

[3] Los fluidos orgánicos son compuestos pesados con pesos moleculares elevados, bajas temperaturas y presiones de ebullición. Una de las formas de caracterizarlos es mediante la pendiente de su curva de saturación de vapor [6].

[4] El calor de baja temperatura (o baja calidad) se refiere a la energía térmica a temperaturas relativamente bajas, que suele encontrarse en el calor residual de procesos industriales u otras fuentes. Generalmente se considera calor inferior a $230C^{\circ}$ y, en algunos casos, inferior a $100C^{\circ}$ [8].

desarrollo. Las innovaciones en el diseño de componentes como intercambiadores de calor y turbinas, así como en la selección de fluidos de trabajo más eficientes y seguros, han llevado a mejoras constantes en el rendimiento y la viabilidad económica del ORC [13]. Estas mejoras no solo optimizan la eficiencia del ciclo, sino que también abren nuevas oportunidades para su aplicación en diversas industrias y condiciones operativas. La integración de tecnologías emergentes y el uso de modelos basado Análisis de Datos y Big Data que son dos disciplinas de la Ciencia de Datos[5] posibilitan ajustar y perfeccionar continuamente el ORC. [16].

La optimización del ORC es un aspecto fundamental para su implementación, ya sea mediante la modernización de sus componentes de fabricación o a través del uso de nuevos desarrollos tecnológicos impulsados por la Ciencia de Datos [17]. En este último caso, el uso de técnicas avanzadas de Análisis de Datos permiten identificar las configuraciones más eficientes y los parámetros operativos óptimos, mejorando considerablemente la eficiencia termodinámica y el costo económico del sistema [18]. Es decir, el uso de estas herramientas permiten monitorear en tiempo real y ajustar con precisión el funcionamiento del ORC, maximizando su rendimiento y minimizando los costos operativos. Por otra parte, el Big Data facilita el análisis de grandes volúmenes de datos históricos y operativos, permitiendo detectar patrones y tendencias que pueden guiar futuros desarrollos tecnológicos y estrategias de mantenimiento preventivo [19].

La Ciencia de Datos [20, 21] como área del conocimiento ha transformado la forma en que se analizan los datos en física, brindando herramientas y técnicas que logran optimizar el desempeño de algoritmos usados comúnmente para el analísis estadísticos de grandes bases de datos [22], el procesamiento y limpieza de datos y métodos computacionales [23] para extraer conocimiento, realizando predicciones y acelerando el avance científico. La aplicación de 2us interdisciplinas en la física ha permitido abordar problemas complejos como el comportamiento temporal a través de modelos matemáticos [24], la estimación de pulsares [25] o en áreas como la astronomía [26]; y también a identificar nuevos fenómenos como ondas gravitacionales [27] y obtener una comprensión más profunda de los procesos físicos. Su impacto en la investigación en

[5]La Ciencia de Datos es un campo interdisciplinario que combina la informática, la estadística y la experiencia en el dominio para extraer información y resolver problemas complejos utilizando datos [14]. William S. Clevelan propone formalmente el término Data Science en 2001 [15].

física es cada vez más significativo, y se espera que continúen impulsando el desarrollo de la ciencia.

Un aspecto crucial del ORC reside en su notable contribución a la sostenibilidad ambiental al aprovechar fuentes de calor renovables, como el calor residual emitido comúnmente en la industria, que en muchas ocasiones se disipa en el ambiente sin utilidad enérgetica. Por este motivo, el ORC no solo complementa la generación de energía y reduce la dependencia de combustibles fósiles, sino que también facilita el aprovechamiento de diversos recursos energéticos, contribuyendo así a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero [28]; todas estas características convierten al ORC en una solución tecnológica ambientalmente sobresaliente [29].

La integración de la Ciencia de Datos con el ORC no solo aumenta la viabilidad comercial de esta tecnología, sino que también desempeña un papel crucial en la transición hacia un sistema energético más sostenible y eficiente.

En la monografía presentada en las siguientes páginas, que constituye una monografía de compilación, se rinde un informe de cinco fuentes relacionadas con investigaciones sobre el ORC y como se han usado diversas herramientas de la Ciencia de Datos para poder profundizar, y ofrecer una postura crítica por parte del autor ante las referencias expuestas. El documento contiene seis capítulos, el Capítulo 2 se dedica a establecer la pregunta monográfica e instaura los objetivos de la monografía; el Capítulo 4 se hace una revisión sobre cinco investigaciones y se explica el método usado en cada estudio experimental, además se realiza una análisis crítico de cada investigación; el Capítulo 5 se establecen las conclusiones finales; y el Capítulo 6 expone las recomendaciones que van orientadas hacia los desafíos y oportunidades acerca del uso de técnicas de ciencias de datos para trabajar el ORC.

2. Enfoque

En este capítulo se clarifican los aspectos más relevantes que sustentan la presente monografía de recopilación. En primer lugar, se expone el planteamiento del problema, el cual ofrece una visión general sobre el ORC y los principales desafíos asociados a su implementación en entornos industriales, especialmente a partir del uso de herramientas avanzadas de Big Data. A partir de ello, se formula la pregunta monográfica, que constituye el punto de partida para la estructuración del documento. Finalmente, se establecen los objetivos generales y específicos que orientan el desarrollo del trabajo.

2.1 Planteamiento del Problema:

El uso de herramientas de Ciencia de Datos ha emergido como una clave esencial para comprender la gestión y procesamiento eficiente de grandes volúmenes de información en diversas áreas del conocimiento. Estas tecnologías y técnicas, que abarcan desde métodos estadísticos hasta algoritmos complejos de aprendizaje automático, encuentran una aplicación creciente en disciplinas como la física, donde facilitan el análisis y la interpretación de fenómenos complejos [30]. Existen múltiples ejemplos documentados en la literatura donde la ciencia de datos ha sido utilizada para aportar al avance del conocimiento científico [24–27].

Es importante resaltar que esta monografía no busca ser una investigación cientifica, si no una recopilación crítica de la bibliografía existente y forma parte de los requisitos necesarios para la obtención del título físico otorgado por la Universidad de Pamplona. Para la composición de esta monografía de recopilación se realiza una revisión bibliográfica integral tanto de artículos científicos recientes como de textos especializados sobre el tema. A partir de esto se han identificado diversas posibilidades que evidencian el potencial de las herramientas aprendidas durante el diplomado titulado: *"Diplomado en Análisis de Datos y Big Data"* de la universisdad Sergio Arboleda cuyo certificado está en los anexos de este documento, las cuales pueden ser aplicadas a problemas concretos de investigación en física. Esta monografía

de recopilación busca analizar, compilar y sintetizar el conocimiento sobre el uso de la ciencia de datos en la termodinámica, la cual constituye una rama fundamental de la física. De esta forma, se evidencia como este enfoque metodológico contribuye al desarrollo y la resolución de problemas científicos específicos.

Como fue mencionado durante la introducción, uno de los campos de mayor relevancia para la aplicación de la ciencia de datos es la termodinámica, donde en los últimos años se han realizado avances significativos en la optimización de sistemas como el ORC, que tiene como objetivo mejorar la conversión de energía térmica en energía mecánica basado en los principios físicos fundamentales de los ciclos termodinámicos [31]. Esta tecnología ha mostrado un notable potencial para la optimización de procesos energéticos, lo que abre nuevas fronteras para la investigación en este campo.

Asimismo, en la revisión bibliográfica se ha evidenciado cómo, en el ámbito de la termodinámica y específicamente en el desarrollo y aplicación del ORC, la ciencia de datos ha sido fundamental para la optimización de proceoss termodinámicos, ayudando a avanzar en la comprensión y mejora de estos sistemas. Esta asociación entre la física y la ciencia de datos no solo evidencia la evolución y la cohesión de estas disciplinas a la investigación científica, sino que también recalca la importancia de integrar enfoques computacionales y analíticos para la resolución de desafíos teóricos y prácticos.

A partir de lo anterior se plantea la siguiente pregunta problematizadora, que constituye el punto de partida para desarrollar el tema planteado en esta monografía de compilación.

2.2 Pregunta Monográfica:

¿Qué optimizaciones han sido desarrolladas y/o investigadas en el campo de los ciclos termodinámicos de Rankine orgánico para aumentar su eficiencia utilizando Big Data y Análisis de datos avanzados?

2.3 Objetivos De La Monografía de Recopilación:

2.3.1 Objetivo General:

Sintetizar a partir de una revisión de cinco avances científicos en la optimización del ORC haciendo énfasis en el uso de Ciencia de Datos para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de estos sistemas.

2.3.2 Objetivos Específicos:

1. Categorizar las aplicaciones de la ciencia de los datos en varias ramas de la física a partir de revisión de documentos científicos.
2. Priorizar la Termodinámica en la revisión de artículos de investigación recientes.
3. Comprender los principios científicos en el ORC.
4. Especificar las aplicaciones de la Ciencia de Datos de cinco avances científicos en el ORC a partir de una revisión documental.

3. Fundamentos del Ciclo Orgánico de Rankine

Este apartado presenta los cimientos conceptuales del ciclo orgánico de Rankine (ORC). El ORC es análogo al ciclo Rankine de vapor (SRC[1]) ya que incorpora todos los componentes esenciales del SRC (evaporador, dispositivo de expansión, condensador y bomba). En el SRC ideal todos los procesos son reversibles; es decir, no se consideran las turbulencias causadas por diferencias de presión favoreciendo la circulación del vapor de agua, e igualmente se consideran insignificantes el rozamiento y las pérdidas de calor al no ser un sistema idealmente aislado [32]. El SRC es la tecnología más utilizada para la generación de energía eléctrica a partir de diferentes procesos termodinámicos originados por la recuperación de calor residual, sin embargo, su eficiencia disminuye significativamente en condiciones de baja temperatura y presión. La eficiencia térmica, la eficiencia exergética[2] y la generación de energía de los sistemás en SRC son inferiores a las de los sistemás de generación de energía ORC con fuentes de calor de baja temperatura [34].

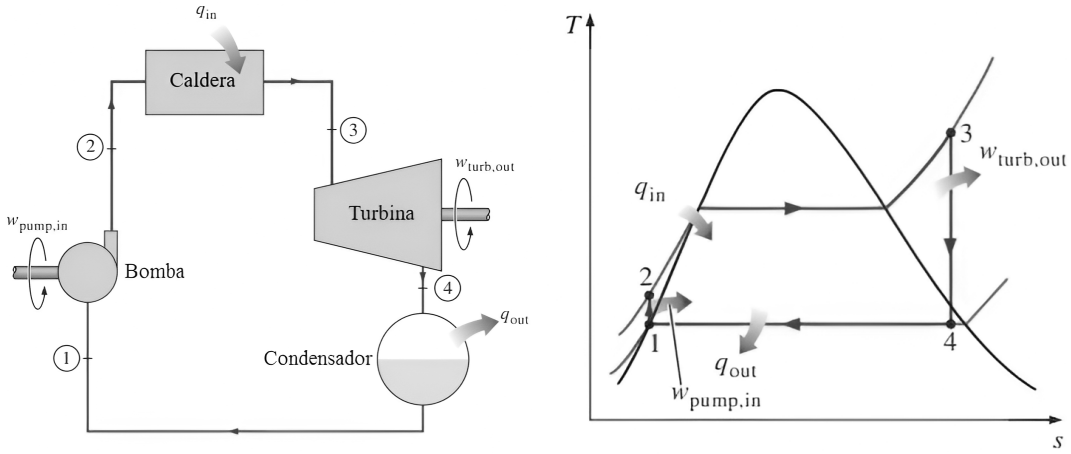
Dado que en la industria existen múltiples aplicaciones que requieren el aprovechamiento de fuentes de calor a baja temperatura para la generación de energía, el ORC ha cobrado una alta importancia como alternativa al SRC. Además, el ORC presenta una diferencia clave frente al SRC, ya que sustituye el agua por un fluido orgánico como medio de trabajo. Entre estos fluidos se ecuentran por ejemplo, hidrocarburos, refrigerantes, éteres y siloxanos [35]. Esta propiedad los hace especialmente adecuados para operar en condiciones térmicas donde el uso de agua resultaría ineficiente o inviable. Así, como se menciono en la introducción, el desarrollo del ORC se alinea con la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles y eficientes, particularmente para la recuperación de calor residual, energía solar de baja temperatura o fuentes geotérmicas moderadas [35–37].

Por otra parte, cuando un ORC está compuesto únicamente de cuatro componentes

[1]Ciclo de Rankine de Vapor (SRC) de sus siglas en inglés: Stem Rankine Cycle.

[2]La exergía se define como la cantidad máxima de trabajo que puede producir un sistema al alcanzar el equilibrio con un entorno de referencia, y puede considerarse una medida de la utilidad o calidad de la energía. La exergía se consume durante los procesos reales debido a irreversibilidades y se conserva durante los procesos ideales [33].

principales, se le denomina simple[3]. Lo anterior se puede observar en la Figura 3.1a, el cual consta de un evaporador o caldera, un expansor o turbina, un condensador y una bomba. Este sistema simple se caracteriza principalmente por su tamaño reducido y la usencia de contaminantes atmosféricos como lo son CO, CO_2, NO_X, entre otros. Sin embargo, la característica más importante es el uso de diversos tipos de fuentes de calor de baja calidad para la generación de energía [38].



(a) Diagrama esquematico del ORC. (b) Grafica T vs s del ORC.

Figura 3.1: ORC simple ideal: (a) Consta de cuatro estapas: De 1 a 2 compresión isentrópica (proceso en el cual la entropía del sistema se mantiene constante) en una bomba, de 2 a 3 adición de calor isobárico (proceso en el cual la presión del sistema se mantiene constante) en una caldera, de 3 a 4 expansión isentrópica en una turbina y de 4 a 1 rechazo de calor isobárico en un condensador. (b) Diagrama de temperatura (T) vs entropía (s), las compresiones y expansiones isentrópicas aparecen como líneas verticales, mientras que los procesos de adición y rechazo de calor a presión constante se representan como líneas horizontales o curvas, el área encerrada por el ciclo en el diagrama es proporcional al trabajo neto producido y a su vez, representa la transferencia de calor para procesos internamente reversibles. La distancia vertical entre los estados 1 y 2 está exagerada para mayor claridad. Tomado de [39].

Para complementar los elementos del ciclo termodinámico mostrados en la Figura 3.1a, observe la Figura 3.1b, donde se representa el ciclo a través del grafico de temperatura y entropía [32]. En este gráfico, cada etapa mencionada en la Figura 3.1a corresponde a un proceso termodinámico específico. En la primera etapa de 1 a 2, el fluido de trabajo en estado de líquido saturado[4] es impulsado por una bomba, lo que

[3]Este ORC a veces se denomina ORC de presión única o de etapa única porque utiliza un solo evaporador [35].

[4]El término líquido saturado se refiere al estado de una sustancia en fase líquida que se encuentra en equilibrio térmico con su fase de vapor, es decir, ha alcanzado la temperatura y presión de saturación

provoca un aumento significativo en su presión sin un cambio sustancial en la entropía. Durante este proceso, la temperatura del fluido puede incrementarse ligeramente debido a la reducción del volumen específico. Posteriormente, en la segunda etapa de 2 a 3, el fluido comprimido entra a la caldera o intercambiador de calor, donde recibe energía térmica de una fuente externa (de energía solar por ejemplo) y experimenta un cambio de fase, pasando a vapor sobrecalentado[5] a alta presión. En la tercera etapa de 3 a 4, el vapor sobrecalentado ingresa al expansor o turbina, donde se expande de manera isentrópica, reduciendo su presión y temperatura mientras genera trabajo mecánico, que puede ser aprovechado para la generación de electricidad. Finalmente (en la cuarta etapa de 4 a 1) el fluido de trabajo entra al condensador, donde cede calor al ambiente o a un sistema de enfriamiento (refrigerante o aire), retornando a su estado de líquido saturado. Este proceso de rechazo de calor a presión constante completa el ciclo, permitiendo que el fluido regrese a la bomba para reiniciar el proceso [39]. El área bajo la curva del proceso 2 a 3 representa el calor transferido al fluido de trabajo en la caldera y el área bajo la curva del proceso 4 a 1 representa el calor rechazado en el condensador.

De forma general, los ciclos termodinámicos se modelan matemáticamente en función de la entalpia (H), la cual corresponde a una función de estado. Esto permite un análisis más detallado de los procesos energéticos que se producen en los diferentes componentes del ORC, donde se generan cambios controlados de temperatura y presión [42]. En otras palabras, el uso de la entalpia posibilita realizar un cálculo de manera práctico ya que se emplea la energía transferida como calor (Q) o trabajo (W) en cada proceso, sin necesidad de analizar directamente los detalles microscópicos del sistema. Esto es posible porque, en el ciclo de Rankine, la relación $Q = \Delta H$ se aplica fácilmente a los procesos isotérmicos o a presión constante [43]. Definido más claramente se tiene que:

$$H = U + PV, \tag{3.1}$$

donde U corresponde a la energía interna, P a la presión y V a el volumen del sistema. En un proceso a presión constante se tiene:

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V, \tag{3.2}$$

correspondientes y está a punto de iniciar su transición a vapor. En este estado, el líquido posee la máxima densidad posible antes de que comience el proceso de evaporación [40].

[5]El vapor sobrecalentado es un vapor a una temperatura superior a su punto ebullición [41].

Considerando la primera ley de la termodinámica:

$$\Delta U = Q - W. \tag{3.3}$$

donde Q es el calor calor transferido y W es el trabajo realizado por el sistema.

$$W = P\Delta V, \tag{3.4}$$

W es el trabajo solo cuando se tiene expansión o compresión, de modo que la Ec. (3.4) pasa a:

$$\Delta U = Q - P\Delta V. \tag{3.5}$$

Reemplazando la Ec. (3.5) en la Ec. (3.2):

$$\Delta H = Q. \tag{3.6}$$

La optención de la ecuación 3.6 muestra que en un proceso a presión constante el cambio de entalpia corresponde a la transferencia de calor. Este resultado permite aplicar la entalpía específica en el análisis de cada uno de los componentes del ORC, facilitando así una evaluación detallada de los procesos termodinámicos involucrados.

Ahora, el intercambio de energía entre un volumen de control[6] y su entorno se logra mediante tres mecanismos: (1) transferencia de calor, (2) trabajo y (3) transferencia de masa. La conservación de la energía en un volumen de control establece que *la tasa de cambio de energía en un volumen de control en un instante determinado es igual a la tasa neta de transferencia de energía al volumen de control en ese instante mediante los tres mecanismos: transferencia de calor, trabajo y transferencia de masa* [45]. Esto es:

[6]Un volumen de control es una región fija del espacio definida por una superficie, real o imaginaria, utilizada para estudiar un sistema o flujo de fluido. A diferencia de un sistema (que es una masa específica que se sigue en el tiempo), el volumen de control permanece estacionario mientras se analiza el flujo a través de él [44].

$$\Delta Energía = +entrada - salida, \tag{3.7}$$

o

$$\frac{dE_{cv}}{t} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + g z_i \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^{\,2}}{2} + g z_e \right), \tag{3.8}$$

donde E_{cv} denota la energía del volumen de control en el tiempo t, $\dot{Q}_{cv}$[7] es la tasa de transferencia de calor a través del límite de un volumen de control, $\dot{W}_{cv}$ es el trabajo a través del límite de un volumen de control, h es la entalpía específica, $\dot{m}$ es el caudal másico, z elevación de entrada o salida y g es la aceleración de la gravedad. Los subíndices i y e se refieren a la entrada y salida del volumen de control, respectivamente.

Para este contexto, dentro de la turbina en la Figura 3.1a, el vapor de la caldera en el estado 1, con temperatura y presión elevadas, se expande para producir trabajo y luego se descarga al condensador en el estado 2 con una presión relativamente baja. Despreciando la transferencia de calor con el entorno, los balances de masa y energía y dado que $\frac{dE_{cv}}{t} = 0$ para un volumen de control alrededor de la turbina, el sistema se reducea un estado estacionario dando la Ec.(3.8) [2]:

$$0 = \cancelto{0}{\dot{Q}_{cv}} - \dot{W}_t + \dot{m} \left[h_1 - h_2 + \cancelto{0}{\frac{V_1^{\,2} - V_2^{\,2}}{2}} + \cancelto{0}{g(z_1 - z_2)} \right], \tag{3.9}$$

o

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_1 - h_2. \tag{3.10}$$

donde $\dot{m}$ denota el caudal másico del fluido de trabajo del ciclo y $\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}}$ es la potencia por unidad de masa de vapor que pasa a través de la turbina.

En el condensador se produce una transferencia de calor del fluido de trabajo al agua

[7] El acento de punto en una expresión denota una variación temporal.

de refrigeración que fluye en una corriente separada. El fluido de trabajo se condensa y la temperatura del agua de refrigeración aumenta. En estado estacionario, los balances de masa y energía para un volumen de control que encierra el lado de condensación del intercambiador de calor dando:

$$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = h_2 - h_3. \tag{3.11}$$

donde $\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}}$ es la energía transferida por calor del fluido de trabajo al líquido de enfriamiento por unidad de masa de fluido de trabajo que pasa a través del condensador.

El líquido condensado que sale del condensador a 3 se bombea desde el condensador a la caldera de mayor presión. Si se toma un volumen de control alrededor de la bomba y se supone que no hay transferencia de calor con los alrededores, los balances de masa y energía dan:

$$\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}} = h_4 - h_3. \tag{3.12}$$

donde $\frac{\dot{w}_p}{\dot{m}}$ es el trabajo de entrada por unidad de masa que pasa por la bomba.

El fluido de trabajo completa un ciclo a medida que el líquido que sale de la bomba en el estado 4, llamado agua de alimentación de la caldera, se calienta hasta la saturación y se evapora en la caldera. Si tomamos un volumen de control que encierra los tubos y tambores de la caldera que transportan el agua de alimentación del estado 4 al estado 1, los balances de masa y energía dan:

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_1 - h_4. \tag{3.13}$$

donde $\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}$ es la energía transferida por calor desde la fuente de energía al fluido de trabajo por unidad de masa que pasa por la caldera.

La eficiencia térmica mide el grado en que la entrada de energía al fluido de trabajo que pasa a través de la caldera se convierte en trabajo neto de salida. Utilizando las cantidades y expresiones que acabamos de introducir, la eficiencia térmica del ciclo de potencia es:

$$\eta = \frac{\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_p}{\dot{m}}}{\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4}. \tag{3.14}$$

La salida neta de trabajo es igual a la entrada neta de calor. Por lo tanto, la eficiencia térmica se puede expresar alternativamente como:

$$\eta = \frac{\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} - \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}}}{\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}} = 1 - \frac{\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}}}{\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4}. \tag{3.15}$$

La eficiencia térmica del ORC suele estar en el rango de 12 % a 20 % dependiendo de la temperatura de la fuente de calor, el fluido de trabajo y el diseño del sistema [46]. Entonces, la proporción del calor rechazado respecto al calor de entrada es:

$$\frac{Q_{in}}{Q_{out}} = 1 - \eta \approx 80\,\% - 88\,\%. \tag{3.16}$$

4. Compilación Documental

El presente capítulo expone una selección de cinco artículos científicos organizados cronológicamente, en los que se explora la evolución del ORC a través de la aplicación de diversas técnicas de Ciencia de Datos. Cada uno de estos trabajos representa un enfoque particular para optimizar, mejorar o implementar el ORC en condiciones reales, integrando conocimientos avanzados de termodinámica con herramientas de ciencia de datos. A lo largo de los artículos, se evidencia cómo la incorporación de modelos de simulación, algoritmos de optimización y métodos computacionales ha permitido profundizar en el comportamiento termodinámico del ciclo, evaluar su desempeño con distintos fluidos de trabajo y configurar sistemas más eficientes y sostenibles. Esta revisión busca no solo mostrar el desarrollo técnico del ORC, sino también destacar el papel creciente que desempeña el análisis de datos en la innovación energética.

Los trabajos investigados son: "*Low-grade Heat-driven Rankine Cycle, A Feasibility Study*" de Husband y Beyene, publicado en 2008 [47]; "*Organic Rankine Cycle (ORC) System Applications for Solar Energy: Recent Technological Advances*" de Mahlia et al., publicado en 2019 [48] "*Optimization of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery From Aluminum Production Plants*" de Castelli et al., en 2019 [49]; "*Performance Prediction and Working Fluid Active Design of Organic Rankine Cycle Based on Molecular Structure* " de Pan et al., en 2022 [50]; y finalmente "*Multi-Objective Optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) for a Hybrid Solar–Waste Energy Plant*" de Wang et al., correspondiente al año 2024 [37]. Esta selección permite ilustrar la evolución y diversidad metodológica en el tratamiento del ORC.

4.1 Ciclo de Rankine impulsado por calor de baja calidad: un estudio de viabilidad (2008).

Como se menciono en el Capítulo 3, una de las fuentes de energía más desaprovechadas es el calor de baja calidad, generado como subproducto en numerosos procesos industriales. Este calor, aunque difícil de utilizar de manera eficiente,

representa un recurso valioso que puede ser transformado en energía útil mediante tecnologías innovadoras [51]. El presente estudio, desarrollado por Husband y Beyene, investiga la factibilidad de adaptar el ciclo de Rankine para aprovechar el calor de baja calidad, evaluando tanto la viabilidad técnica como económica de esta propuesta, así como su impacto ambiental.

El enfoque del estudio se centra en optimizar el ciclo de Rankine mediante la selección de fluidos de trabajo y componentes que permitan convertir el calor residual en energía eléctrica de alta calidad. Adicionalmente, los autores exploran la posibilidad de integrar energía solar térmica en el sistema, utilizando colectores solares concentrados para aumentar la temperatura del fluido de trabajo.

Para seleccionar un fluido adecuado, consideraron varios criterios relacionados con propiedades térmicas, impacto ambiental y seguridad. Los fluidos se evaluaron en base a sus temperaturas de ebullición, toxicidad, inflamabilidad, eficiencia térmica [52], compatibilidad y costo. Entre las opciones, se destacaron los hidrofluorocarbonos (HFC), hidroclorofluorocarbonos (HCFC) e hidrofluoroéteres (HFE). Los HFE mostraron ventajas significativas debido a su bajo potencial de agotamiento de ozono (ODP[1] [54]) y bajo potencial de calentamiento global (GWP[2]).

Los fluidos evaluados por Husband y Beyene incluyen: R-30 (cloruro de metileno), con un bajo punto de ebullición de $40C°$, un GWP de 9, pero alta toxicidad e inflamabilidad [56]. También consideraron los HFE-254pc y HFE-356mec, que tienen valores moderados de GWP (353 y 99) y carecen de potencial de agotamiento de ozono, aunque su obtención es limitada debido a restricciones regulatorias (Están clasificados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA[3]) como compuestos químicos orgánicos volátiles [55]). Finalmente, el HFE-7000 (éter metílico de heptafluoropropilo) destacó como la opción más viable debido a su seguridad, bajo impacto ambiental y propiedades térmicas adecuadas, con un GWP moderado (370),

[1]Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP) por sus siglas en inglés: Ozone Layer Depletion Potential. El ODP se puede estimar a partir de la estructura molecular de una sustancia determinada, el rango de esta medida oscila entre 0 y 19 [53].

[2]Potencial de Calentamiento Global (GWP) de sus siglas en inglés: Global Warming Potential. Se define como la relación entre el forzamiento radiativo acumulado dentro de un horizonte temporal específico causado por la emisión de 1 kilogramo de gas, en relación con el del gas de referencia CO_2 ($GWP = 1$), puede tener un rango de valores muy amplio, desde 0 hasta decenas de miles [55].

[3]Agencia de Protección Ambiental (EPA) pos sus siglas en inglés: Environmental Protection Agency.

no inflamabilidad y un tiempo de vida atmosférico de cuatro años.

Utilizando las propiedades intrínsecas de los fluidos seleccionados (Tabla 4.1), Husband y Beyene desarrollaron un modelo matemático semejante al realizado en el Capítulo 3 para analizar el desempeño del ciclo. Los resultados indicaron que la eficiencia térmica óptima se logró con una relación de presión de 8:1 (específicamente a la relación entre la presión alta, después de la bomba o el calentamiento, y la presión baja, antes de la bomba o después de la expansión; en este caso, 8:1 significa que la presión en la entrada de la turbina o expansor es 8 veces mayor que la presión en la salida del condensador). Sin embargo, para reducir la necesidad de sobrecalentamiento, recomiendan operar en un rango de 4:1 a 5:1. A un flujo másico de 0.75 kg/s, el sistema requiere un condensador con una capacidad de 110 kW para garantizar la conversión completa del fluido a su estado líquido. Además, los autores observaron un aumento significativo en la eficiencia térmica cuando se aplicó sobrecalentamiento al fluido de trabajo, como se muestra en la Figura 4.1.

Tabla 4.1: Comparación de R-30 y HFE-7000: Aunque el R-30 tiene ventajas ambientales, el HFE-7000 fue seleccionado como mejor opción por su seguridad operativa (no inflamable, no tóxico) y compatibilidad con aplicaciones prácticas, a pesar de su mayor GWP. Tomado de [57]

	(R-30)	**HFE-7000**
$T_{Boiling}$ @ P_{atm} (C°)	40 ($104F^{\circ}$)	29.5 ($85F^{\circ}$)
ODP	0	0
GWP	9	370
ALT (años)	0.5	4
Toxicidad	Classe B (Toxico)	Clase A (No Toxico)
Inflamabilidad	Clase 2 (Inflamable)	Clase 1 (No Inflamable)
$T_{Critico}$ (C°)	236 ($457F^{\circ}$)	186 ($367F^{\circ}$)

En la investigación proponen remplazar la turbina tradicional del ciclo por un compresor de desplazamiento, que ofrece alta fiabilidad y eficiencia razonable (50 %) debido a su diseño con pocas partes móviles. Este sistema tiene la capacidad de generar 10 kW de potencia eléctrica con un costo estimado de $22,000, recuperable en un periodo de 7.5 años como se evidencia en la Tabla 4.2.

Después de realizado este trabajo investigativo los autores presentan sus concluciones en las cuales se resalta que es técnica y económicamente viable

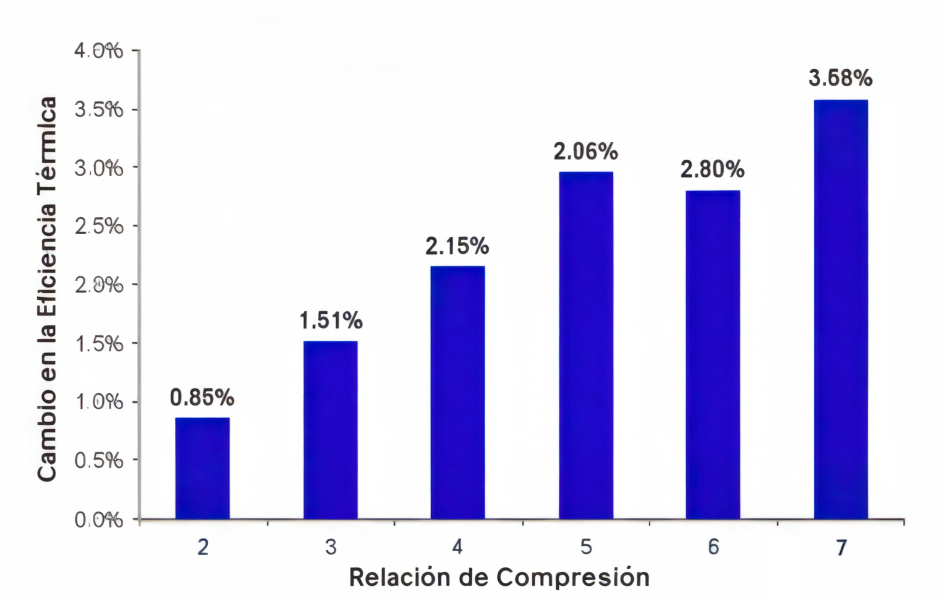


Figura 4.1: Ganancia de eficiencia gracias al sobrecalentamiento: El modelo muestra que el sobrecalentamiento del HFE-7000 incrementa la eficiencia térmica del ciclo, el beneficio es más notable a temperaturas moderadas. A temperaturas muy altas, las ganancias se reducen debido a limitaciones en las propiedades del fluido y mayores pérdidas térmicas. Tomado de Husband y Beyene (2008) [47].

Tabla 4.2: Desglose del Costo del Sistema: Esta tabla respalda el análisis económico del estudio, mostrando que la tecnología es viable frente a alternativas como la energía solar fotovoltaica, pero requiere optimización de costos para ser competitiva a gran escala. Se menciona que el precio podría reducirse con la producción en masa de compresores de desplazamiento, en fase prototipo al momento de realizar el estudio. Tomado de Husband y Beyene (2008) [47].

Componente	**Precio, $**
Generador10 kW	$10,000$
Fluido de Trabajo HFE-7000	1150
Bomba	1270
Intercambiador de calor	2547
Supercalentador	2150
Condensador	2675
Termistores	200
Tuberías, Válvulas	1000
Varios, Hardware	500
Total	$21,992$

implementar un sistema de recuperación de calor residual basado en el ciclo de Rankine adaptado. La integración de energía solar térmica y el uso de colectores solares mejoran significativamente el desempeño del sistema. Los fluidos de trabajo R-30 y HFE-7000 son opciones prometedoras, siendo el último más viable por su menor impacto ambiental y seguridad. Además, el modelo teórico basado en HFE-7000 muestra una eficiencia térmica simulada del 11 %, lo que demuestra el potencial del ciclo adaptado para aplicaciones reales. Los avances en tecnología de componentes individuales, junto con una selección adecuada de fluidos, permiten diseñar y probar este nuevo enfoque.

Basado en los datos y el estudio investigativo realizado por Husband y Beyene, este artículo cientifíco representa un valioso acercamiento temprano en la investigación del ORC como una solución energética sostenible y amigable con el medio ambiente. A pesar de tener limitaciones propias de la época (año 2009), este trabajo es pionero y sienta buenas bases para las futuras investigaciones en el campo. Por otro lado, en la fecha de publicación existía una limitación en cuanto a la cantidad de datos disponibles para este tipo de investigaciones, lo que restringía el alcance del análisis estadístico y dificultaba la identificación de fenómenos que permitieran una mejor optimización del sistema.

Con todo lo recopilado en esta monografía en relación con este artículo pionero, se destacan sus conclusiones sólidas y valiosas para el entendimiento de la optimización del ORC, lo cual abre paso a nuevas ideas para futuras investigaciones. Estas, con una mayor disponibilidad de datos, podrían permitir configuraciones del ORC que maximicen su eficiencia en la generación de energía.

4.2 Aplicaciones del Sistema del Ciclo orgánico de Rankine (ORC) para la Energía Solar: Avances Tecnológicos Recientes (2019).

Este artículo ofrece una revisión general de las patentes existentes hasta la fecha de estudio sobre cómo se aplica el ORC en sistemas de energía solar. Aunque ha habido numerosas investigaciones sobre el ORC, los autores afirman que ninguna se había centrado específicamente en el análisis de patentes en este campo hasta el momento de su publicación. El objetivo principal de los autores es identificar y analizar las patentes

publicadas sobre ORC aplicadas a la energía solar, centrándose en cuatro tecnologías clave: disco parabólico [58], cilindro parabólico [59], torre solar [60] y reflector lineal de Fresnel [61]. El estudio abarca el período de 2007 a 2018 y utiliza la base de datos Derwent Innovation, que contiene más de 51 millones de patentes [62]. De estas, Mahlia y compañia identificaron inicialmente 3859 patentes relacionadas con el ORC, de las cuales 1100 fueron seleccionadas para su revisión.

En palabras de los autores: *'El aumento de los gases de efecto invernadero ha provocado cambios climáticos significativos, como el aumento de las temperaturas del aire y los océanos, el incremento del nivel del mar y eventos climáticos extremos. El Acuerdo de París, establecido bajo los auspicios de las Naciones Unidas, tiene como objetivo reducir estos gases y limitar el aumento de la temperatura global a 2C° en este siglo.'* [63]. Para lograr esto, los investigadores están explorando fuentes de energía alternativas menos contaminantes, como la energía generada a partir de biomasa [64], combustibles sólidos [65], biocombustibles [66], energía hidroeléctrica [67], eólica [68] y nuclear [69]. En países tropicales, donde la irradiación solar es abundante, la energía fotovoltaica es muy popular, con implementaciones exitosas [70].

Otra forma de aprovechar la energía solar es mediante el uso de calor de baja calidad, que a menudo se descarta. Como se ha mencionado el ORC es una opción popular para la generación de energía a partir de fuentes de calor de baja temperatura y presión, ya que utiliza componentes simples y ampliamente disponibles en el mercado. Aunque las plantas de generación de energía ORC no están diseñadas exclusivamente para la energía solar, se han utilizado en diversas aplicaciones [71] [72]. Este estudio se centra en el panorama de patentes de sistemas ORC que utilizan calor de baja calidad, baja presión y baja temperatura, específicamente para aplicaciones de energía solar.

El análisis de patentes es crucial tanto en el ámbito académico como en el corporativo, ya que sirve como guía para el desarrollo tecnológico y tiene un gran potencial económico a través de la comercialización [73]. En este estudio, los autores usaron la plataforma Derwent Innovation [62] para realizar búsquedas avanzadas de patentes relacionadas con aplicaciones de ORC en energía solar. Emplearon palabras clave en los títulos y reivindicaciones de las patentes, y los resultados se exportaron a

Microsoft Excel para un análisis sistemático. Utilizaron la declaración PRISMA[4] [74] como base para la revisión de patentes, y siguieron un proceso metódico para identificar, seleccionar y analizar las patentes relevantes, tal y como se muestra en la Figura 4.2.

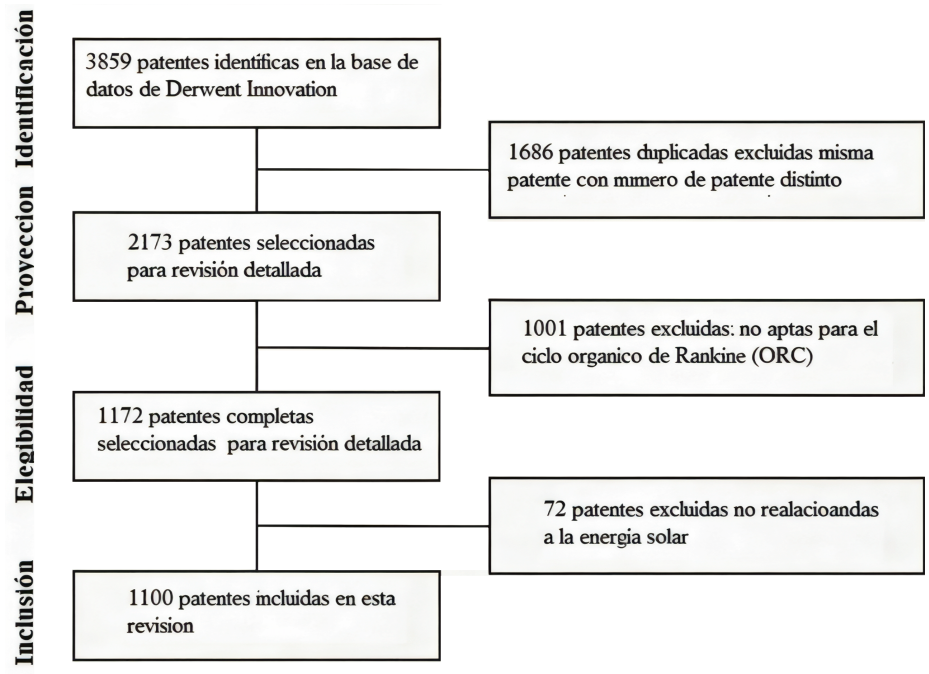


Figura 4.2: Diagrama de flujo del proceso adoptado para revisar los resultados de las patentes; basado en la Declaración PRISMA: Empleado para sistematizar la selección de patentes relacionadas con aplicaciones del ORC en energía solar. De las 3859 patentes identificadas inicialmente, se eliminaron 1686 por duplicación, y de las 2173 restantes, se excluyeron 1001 por no ser aplicables al ORC y 72 por no cumplir con los criterios de elegibilidad para tecnologías de energía solar. Finalmente, se incluyeron 1100 patentes para su revisión [74].

La distribución de las patentes por tecnología mostró que los cilindros parabólicos son la tecnología más patentada, posiblemente debido a su asequibilidad y mayor eficiencia energética en comparación con otras tecnologías. La Figura 4.3 muestra la distribución anual de las patentes publicadas entre 2007 y 2018.

Como se muestra en la Figura 4.4, los tres principales países/organizaciones con más patentes son China (37 %), la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WIPO, 22 %) y Estados Unidos (20 %), que en conjunto representan el 79 % de las

[4]Elementos de informe preferidos para revisiones sistemáticas y metanálisis (PRISMA) de sus siglas en inglés: Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

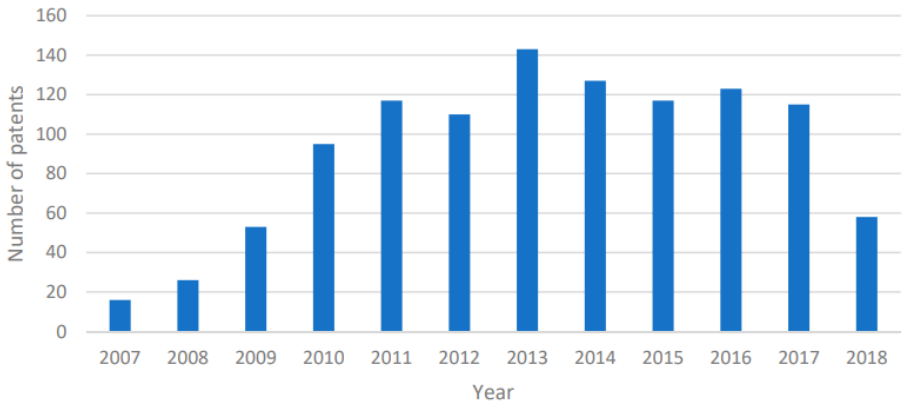


Figura 4.3: Número anual de patentes publicadas entre 2007 y 2018: En 2007, solo se publicaron 16 patentes relacionadas con ORC, pero hubo un aumento constante hasta 2013, con una ligera disminución en 2014 y 2015. Entre 2015 y 2017, el número de patentes se mantuvo estable, con un rango de 115 a 125 patentes por año. En 2018, aunque los datos solo cubren hasta julio, se publicaron 59 patentes, lo que sugiere que el número total para ese año podría ser similar al de años anteriores [48].

patentes seleccionadas. China lidera en patentes relacionadas con torres solares, con 217 patentes, seguida de reflectores lineales de Fresnel (81 patentes) y cilindros parabólicos (81 patentes). Sin embargo, a nivel global, la tecnología de cilindros parabólicos es la más preferida.

En cuanto a los avances tecnológicos destacados por los autores, identificaron diversas patentes innovadoras que demuestran el creciente interés en la integración de sistemas ORC con tecnologías solares avanzadas. Una de ellas describe un sistema de generación de energía solar basado en ORC con modos exotérmicos múltiples y colectores de ranura parabólica, que busca aumentar la duración operativa del sistema y reducir el tiempo de retorno de la inversión [75]. Otra patente combina colectores solares parabólicos y discos con motores Stirling y ORC, permitiendo un uso híbrido de fuentes térmicas que mejora el rendimiento general [76].

Destacan también una patente basada en la integración en serie de subsistemas fotovoltaicos, fototérmicos y termoeléctricos con un ORC completo (intercambiador de calor, condensador, turbina, bomba y tanque de almacenamiento), lo cual optimiza el aprovechamiento de la energía solar capturada, incrementando la eficiencia global y reduciendo los costos del ciclo de vida [77]. Otras invenciones se enfocan en métodos

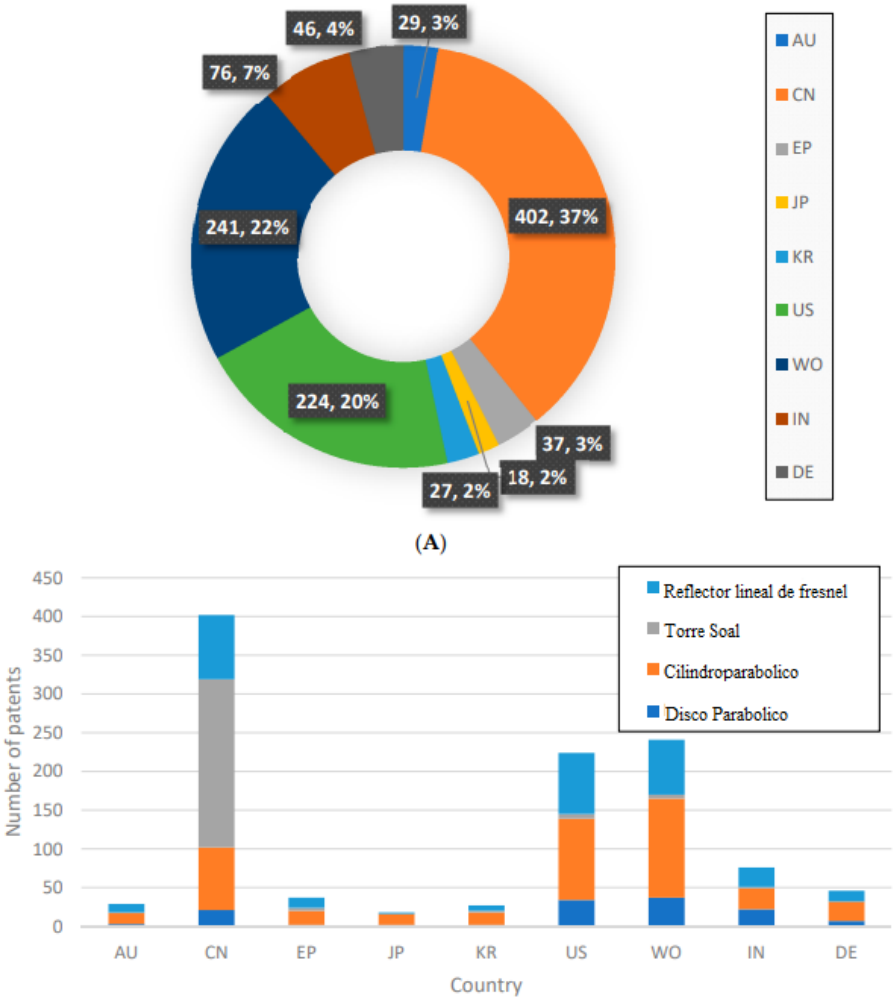


Figura 4.4: (A) Distribución de los orígenes de las patentes seleccionadas según países/organizaciones con códigos de país: CN (China); EP (Oficina de la Unión Europea); JP (Japón); KR (Corea); US (Estados Unidos); WO (Organización Mundial de la Propiedad Intelectual, OMPI); IN (India); DE (Dinamarca). (B) Número de patentes y tecnologías de energía solar en aplicaciones ORC para diferentes países/organizaciones. Tomado de Mahlia et al. [48].

de control del flujo térmico en los colectores solares conectados a sistemas ORC, usando tuberías distribuidoras y concentradores parabólicos para mejorar la estabilidad y eficiencia energética [78].

Según los autores, el ORC es una tecnología prometedora para la generación de energía a partir de fuentes de calor de baja y media temperatura, como la energía solar. La revisión del panorama de patentes muestra que China y Estados Unidos están

a la vanguardia en el desarrollo de estas tecnologías, con un interés creciente en las torres solares. La implementación de estas tecnologías podría acelerarse si se logran comercializar las patentes existentes, lo que contribuiría a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y avanzar hacia un futuro energético más sostenible.

La técnica comparativa utilizada en el análisis de datos se destaca como una de las mejores metodologías para este tipo de estudios. Comparar diferentes parámetros y resultados permite identificar patrones y tendencias que de otro modo podrían pasar desapercibidos. Este enfoque ha demostrado ser extremadamente útil, incluso cuando se trabaja con bases de datos más amplias que, aunque no llegan a la escala de Big Data, aún proporcionan una cantidad significativa de información valiosa. La comparación es crucial para resaltar diferencias y similitudes que pueden ser esenciales para las conclusiones del estudio.

Además, el artículo subraya cómo el orden y el filtrado de los datos son esenciales para obtener conclusiones precisas y fiables. A través de una gestión cuidadosa y sistemática de la información, se logra una mayor claridad en los resultados, lo que facilita la toma de decisiones informadas. Este proceso de organizar y limpiar los datos es vital para cualquier análisis, asegurando que los resultados sean exactos y relevantes.

Si bien se utilizó un enfoque y herramientas relativamente simples, como la declaración PRISMA y el análisi comparativo en Microsoft Excel, el estudio destaca la importancia de las técnicas adecuadas de análisis de datos y demuestra que, con una metodología correcta, es posible obtener resultados significativos y útiles. La simplicidad de las herramientas no limita la profundidad y validez del análisis, y este estudio es un ejemplo claro de cómo un enfoque meticuloso y bien estructurado puede superar las limitaciones tecnológicas iniciales.

Este artículo científico demuestra que, aunque se cuente herramientas básicas, se pueden lograr resultados valiosos mediante técnicas adecuadas de análisis de datos. La claridad en la visualización, la utilidad de las comparaciones, y la importancia del orden y el filtrado de datos son aspectos fundamentales que contribuyen al éxito del estudio y proporcionan una base sólida para futuras investigaciones.

4.3 Optimización de Ciclos Orgánicos de Rankine para la Recuperación de Calor Residual en Plantas de Producción de Aluminio (2019).

Este estudio se enfoca en la recuperación eficiente de calor residual en la industria del aluminio mediante ORC, los autores afirman que esta es una estrategia relevante dado que cerca del 50 % de la electricidad utilizada en la electrólisis[5] del aluminio se disipa como calor [80]. La investigación se estructura en torno a un caso hipotético donde se planea construir una fábrica de aluminio basado en condiciones geográficas y ambientales, en el cual se identifican dos corrientes residuales significativas: gases de escape de las cubas electrolíticas a $180C^{\circ}$ y aire de enfriamiento de celdas a $250C^{\circ}$, ambas con una disponibilidad térmica de $7.8MW$. Estas corrientes se utilizan como fuentes simultáneas para alimentar un ORC de diseño optimizado.

La metodología adoptada combina modelado termodinámico avanzado y optimización tecnoeconómica. En la fase termodinámica, se emplea el algoritmo evolutivo PGS-COM[6], que permite la exploración sistemática de las variables independientes del ciclo (presión de evaporación, presión de condensación, temperatura de entrada a turbina y composición del fluido de trabajo) con el fin de maximizar la eficiencia exergética[7] del sistema [82]. Esta eficiencia se calcula bajo la formulación clásica que incorpora el rendimiento del ciclo en función de la calidad energética de las fuentes térmicas, ajustada por la temperatura logarítmica media entre los extremos de cada corriente [83]. Las propiedades termodinámicas de 102 fluidos (72 puros y 30 mezclas zeotrópicas) se determinaron utilizando REFPROP v9.1 [84], y se impusieron restricciones clave como fracción de vapor ≤ 0.88 en el expansor, presión mínima de condensación de $0.03\,bar$ y diferencias de temperatura $\leq 5C^{\circ}$ en los intercambiadores.

Una contribución clave del trabajo es la aplicación de la metodología de

[5]La electrólisis es una técnica que utiliza corriente eléctrica continua para impulsar una reacción química que, de otro modo, no sería espontánea. La electrólisis es importante comercialmente como una etapa en la separación de elementos de fuentes naturales, como los minerales, mediante una celda electrolítica [79].

[6]Algoritmo complejo de conjunto generador de partículas (PGS-COM) por sus siglas en inglés: Particle Generating Set-Complex Algorithm

[7]La eficiencia exergética calcula la efectividad de un sistema en relación con su rendimiento en condiciones reversibles. Se define como la relación entre la eficiencia térmica de un sistema real y una versión idealizada o reversible del sistema para motores térmicos [81].

Kalitventzeff y Maréchal[8] para resolver el problema de integración de calor entre las fuentes térmicas del proceso y los componentes del ciclo ORC. Esta técnica, basada en programación lineal y curvas compuestas, determina el caudal másico máximo del fluido de trabajo que puede integrarse térmicamente con los límites impuestos por los gradientes mínimos de temperatura. El tiempo computacional promedio por fluido fue de 30 minutos, totalizando cerca de 2000 evaluaciones por caso.

Uno de los hallazgos más relevantes de la fase termodinámica es la relación entre la temperatura crítica del fluido y la eficiencia exergética máxima alcanzable. Esta correlación se visualiza en la Figura 4.5, que muestra cómo los fluidos con temperatura crítica entre el 80 % y 84 % de la temperatura máxima de la fuente térmica ($523.15K^{\circ}$) tienden a lograr los mejores desempeños.

En efecto, Castelli et al. identificaron que el fluido puro RE347mcc destaca con una eficiencia exergética de 85.28 %, seguido por R1336mzz y R1233zde, que ofrecen rendimientos comparables con menor impacto ambiental. La mezcla isobutano/isopentano (66/34 %) logra una mejora del 2.8 % en eficiencia y 3.3 % en potencia neta respecto al mejor fluido puro, debido a su deslizamiento térmico durante la condensación, que favorece una mejor adaptación a la curva térmica del proceso y reduce irreversibilidades.

En la fase de optimización tecnoeconómica (enfoque de análisis que combina criterios técnicos como la eficiencia termodinámica del ciclo, el diseño del sistema y las propiedades de los fluidos de trabajo; y económicos como costos de inversión, costos operativos y beneficios por generación eléctrica), los autores seleccionaron los fluidos más prometedores para diseñar simultáneamente el ciclo ORC y la red de intercambiadores de calor (HEN[9]) bajo un modelo MINLP[10]. Este modelo incorpora los costos de capital e instalación, las eficiencias térmicas, coeficientes de transferencia de calor (basados en datos empíricos para fluidos orgánicos y mezclas), y los precios

[8]La metodología de Kalitventzeff y Maréchal (1999) es una técnica de optimización de integración térmica que permite determinar el flujo másico máximo de un fluido de trabajo en un sistema termodinámico, como un ciclo ORC, que puede ser calentado o enfriado por corrientes de proceso, respetando las restricciones de transferencia de calor [85].

[9]Red de Intercambiadores de Calor (HEN) por sus siglas en inglés: Heat Exchanger Network

[10]Programación no Lineal de Enteros Múltiples (MINLP) por sus siglas en inglés: Multiple Integer Non-Linear Programming [86].

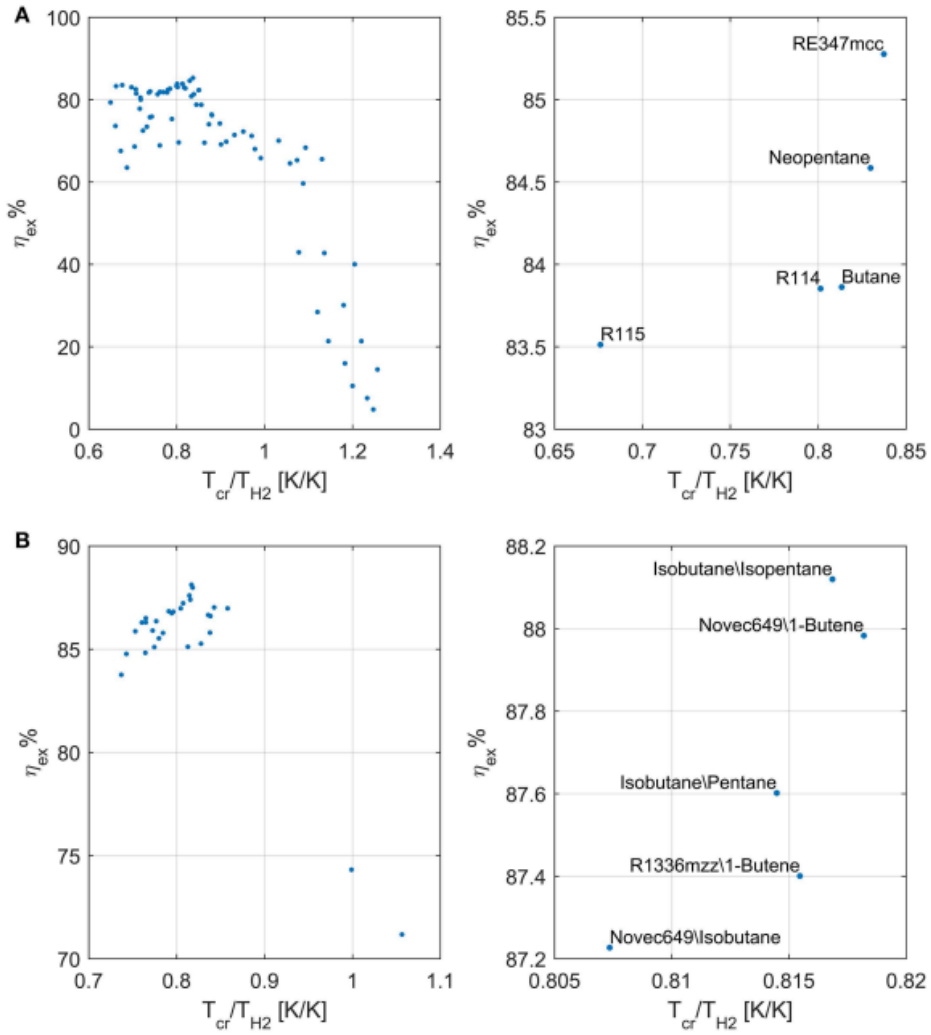


Figura 4.5: Relación entre la eficiencia exergética máxima alcanzable y la temperatura crítica de (A) Fluidos puros y (B) Mezclas zeotrópicas. Se observa que las mezclas más eficientes tienen temperaturas críticas dentro del $80 - 82\,\%$ del máximo de la fuente térmica.. Tomado de Mahlia et al. [49].

de electricidad en dos escenarios: $70\$/MWh$ (bajo costo) y $140\$/MWh$ (alto costo). La resolución del problema se logró mediante una descomposición bietápica (MILP + NLP[11]) .

Los resultados consignados en las Tablas 4.3 y 4.4 revelan que, en el escenario de bajo precio eléctrico, RE347mcc ofrece el mejor desempeño económico con una potencia

[11]Programación no Lineal (NLP) por sus siglas en inglés: Nonlinear Programmin.

neta de $2316.2kW$ y un costo anual total (TAC[12]) de $272.5k\$/año$, resultado de su alta eficiencia y requerimientos moderados de área de intercambio térmico segun los investigadores. En el escenario de alto precio eléctrico, tanto RE347mcc como la mezcla isobutano/isopentano alcanzaron beneficios netos de hasta $1.65M\$/año$, en palabras de los autores *acercándose al óptimo termodinámico en términos de rendimiento energético y caudales másicos del fluido de trabajo*. Un hallazgo relevante fue la superioridad del regenerador frente a los economizadores, ya que los vapores orgánicos poseen coeficientes de transferencia de calor significativamente más altos ($3000W/mK$ para los fluidos puros []) que las corrientes de aire ($70W/mK$), lo que reduce el área requerida y los costos de inversión.

Aunque las mezclas zeotrópicas demostraron ventajas termodinámicas claras (mayor adaptación a la curva térmica del proceso y menor irreversibilidad), su implementación práctica enfrenta desafíos operativos y de seguridad, especialmente por la inflamabilidad y la necesidad de control de composición frente a posibles fugas. Así, el estudio concluye que un diseño óptimo de ORC debe considerar simultáneamente criterios termodinámicos (como temperatura crítica y entalpía de evaporación), criterios económicos (TAC, eficiencia energética) y criterios de seguridad operativa, particularmente en aplicaciones industriales de gran escala.

Se considera que este estudio ofrece una contribución significativa en la optimización del ORC, gracias a su modelo matemático bien estructurado y al uso de técnicas avanzadas de física computacional. El estudio utiliza el modelo matemático formulado en el Capítulo 3 como un problema de optimización MINLP, que busca minimizar el TAC del sistema combinando el diseño del ciclo ORC y de la red HEN. La función objetivo considera inversiones, costos operativos y beneficios por generación eléctrica. El modelo incluye variables continuas (presiones, temperaturas, caudales, áreas) y binarias (activación de corrientes e intercambiadores), bajo restricciones termodinámicas y lógicas como balances energéticos, fracción de vapor mínima y diferencia de temperatura. Para resolverlo, se aplica una descomposición bietápica, un problema maestro MINLP selecciona la estructura óptima, y un subproblema NLP optimiza las condiciones operativas. Esta estrategia permite encontrar configuraciones viables, energéticamente eficientes y económicamente

[12]Costo Anual Total (TAC) por sus siglas en inglés: Total Annual Cost.

Tabla 4.3: Resultados de la optimización tecnoeconómica para el escenario de precio eléctrico bajo (70\$/MWh): RE347mcc obtuvo el mejor desempeño con 2316.2kW de potencia neta y un TAC de $-272.5k\$/ao$ (beneficio económico), R1336mzz generó menos potencia (1857.4kW) debido a limitaciones en la integración térmica, resultando en un TAC un 15 % inferior y la mezcla logró un equilibrio intermedio (2045.5kW), pero su rentabilidad fue menor (-9.5 % vs. RE347mcc) por mayores costos de equipos. Todos los diseños incluyeron un regenerador, clave para mejorar la eficiencia económica al reducir la dependencia de economizadores. Tomado de [49].

Resultados de optimización	**RE347mcc**	**R1336mmz**	**Mezcla de isobutano-isopentano (0,66/0,34)**
Caudal másico del fluido de trabajo ORC, kg/s	69.32	45.84	24.42
Regenerador (Sí/No)	Si	Si	Si
Potencia eléctrica neta, kW	2316.2	1857.4	2045.5
Eficiencia eléctrica neta, η_I	14.85 %	11.91 %	13.11 %
Eficencia exergética	51.11 %	40.99 %	45.14 %
Número de intercambiadores de calor	6	5	5
Área total de transferencia de calor, m^2	8.977	6.398	7.201
Costo de los intercambiadores de calor, $k\$$	2007.4	1475.6	1686.2
Costo de maquinaria, $k\$$	1215.2	1042.9	1143.3
TAC (ORC y HEN), $k\$/ao$	-272.5	-236.7	-246.6

atractivas para recuperar calor residual en procesos industriales.

La capacidad de este modelo para analizar una amplia gama de sustancias proporciona una comprensión detallada de sus propiedades y comportamientos específicos en el contexto del ORC, lo cual es fundamental para la optimización de estos sistemas. El uso de un modelo matemático robusto permite predecir con

Tabla 4.4: Resultados de la optimización tecnoeconómica para el escenario de precio eléctrico alto (140\$/MWh): RE347mcc y la mezcla isobutano/isopentano alcanzaron beneficios anuales similares ($-1.65M$\$/$año$), con potencias netas de $2598.4kW$ y $2653kW$, respectivamente, R1336mzz mostró un costo de HEN un 92.5 % mayor que en el escenario bajo, penalizando su TAC ($-1552.1k$\$/$año$) y La mezcla destacó en eficiencia (17.01 % vs. 16.66 % de RE347mcc), pero su viabilidad práctica se ve limitada por riesgos de inflamabilidad y costos adicionales no contabilizados. Tomado de [49].

Resultados de optimización	**RE347mcc**	**R1336mmz**	**Mezcla de isobutano-isopentano (0,66/0,34)**
Caudal másico del fluido de trabajo ORC, kg/s	77.77	63.37	31.65
Regenerador (Sí/No)	Si	Si	Si
Potencia eléctrica neta, kW	2598.4	2567.8	2653.0
Eficiencia eléctrica neta, η_I	16.66 %	16.46 %	17.01 %
Eficencia exergética	57.34 %	56.66 %	58.54 %
Número de intercambiadores de calor	7	7	6
Área total de transferencia de calor, m^2	13.195	14.202	13.127
Costo de los intercambiadores de calor, k\$	2646.6	2841.0	2730.6
Costo de maquinaria, k\$	1312.6	1295.6	1361.1
TAC (ORC y HEN), k\$/$año$	-1639.2	-1552.1	-1658.2

precisión el rendimiento del ciclo bajo diversas condiciones operativas. Esto es crucial para optimizar la eficiencia y viabilidad del sistema, ya que permite ajustar y mejorar los parámetros operativos de manera informada. La precisión en la predicción del rendimiento es un elemento clave para el diseño y desarrollo de sistemas ORC más eficientes y sostenibles.

Además, la aplicación de técnicas de física computacional en el análisis y simulación del ORC demuestra la capacidad de estos métodos para manejar la complejidad y las interacciones dinámicas de los diferentes componentes y fluidos de trabajo. Estas técnicas permiten realizar simulaciones detalladas que proporcionan información valiosa sobre el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios, lo cual es esencial para el diseño y la optimización de los ciclos ORC.

El artículo también profundiza en aspectos cruciales como el costo de fabricación y la sostenibilidad del ORC. Este enfoque integral es fundamental para evaluar no solo la viabilidad técnica, sino también la económica y ambiental del sistema. La consideración de los costos de producción y la sostenibilidad a lo largo del ciclo de vida del ORC proporciona una visión más completa y realista de su potencial impacto y beneficios.

La combinación de estos elementos ofrece una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo del ORC. La capacidad de integrar el análisis técnico con consideraciones económicas y ambientales asegura que las futuras implementaciones del ORC no solo serán eficientes y viables, sino también sostenibles y beneficiosas desde un punto de vista ecológico. Este estudio, por lo tanto, representa un avance significativo en la comprensión y desarrollo de tecnologías ORC.

4.4 Predicción del Rendimiento y Diseño Activo del Fluido de Trabajo del Ciclo Orgánico de Rankine Basado en la Estructura Molecular (2022)

En este estudio, los autores desarrollan un enfoque metodológico exhaustivo en el diseño activo de fluidos de trabajo para ORC, basándose en la predicción de propiedades termofísicas a partir de la estructura molecular. Pan et al. aseguran que el rendimiento térmico de un ORC depende fuertemente de las propiedades del fluido de trabajo, tales como temperatura crítica (T_c), presión crítica (p_c), punto de ebullición (T_b), capacidad calorífica isobárica (c), entalpía y entropía de evaporación (h_{vap} y s_{vap}). La selección precisa de dicho fluido permite maximizar la eficiencia térmica del ciclo, especialmente cuando se opera con fuentes de calor de baja temperatura.

Tradicionalmente, la elección del fluido de trabajo se ha abordado mediante selección pasiva [47–49, 87–89], que consiste en evaluar alternativas dentro de un

conjunto preexistente de sustancias conocidas. Aunque este método ha facilitado avances importantes, *'está limitado por el alcance del conjunto de datos disponible y no permite descubrir nuevas moléculas con mejor desempeño'*. Para superar esta limitación, los autores proponen un enfoque de selección que denominan como *'activa'*, basado en el diseño racional de moléculas desde su estructura química, sin depender de bases de datos predeterminadas. Esta metodología combina técnicas de diseño molecular asistido por computador (CAMD[13]) con modelos de predicción de propiedades y simulación termodinámica de ciclos [91].

La primera etapa del estudio consistió en establecer un modelo de relación cuantitativa entre estructura y propiedad (QSPR[14]) para predecir propiedades termofísicas fundamentales a partir de descriptores moleculares[15]. Para ello, se recopilaron datos experimentales de 220 compuestos orgánicos del NIST[16], y se calcularon más de 5600 descriptores moleculares utilizando el software AlvaDesc [94]. Tras una etapa de filtrado estadístico y regresión paso a paso, se seleccionaron los 10 descriptores más significativos para cada propiedad objetivo (T_c, p_c, T_b y c_0). Estos descriptores fueron empleados como variables de entrada en redes neuronales de retropropagación (BP neural networks [95]) de tres capas y entrenamiento mediante el algoritmo de Levenberg–Marquardt [96]. El conjunto de datos se dividió en subconjuntos de entrenamiento, validación y prueba (70/15/15), cuyas comparaciones se pueden visualizar en la Figura 4.6, obteniéndose coeficientes de correlación superiores a 0.98 para T_c, p_c y T_b, y una precisión aceptable para c_0.

Estas propiedades predichas fueron luego utilizadas por Pan et al. como insumo para el modelo parametrizado del fluido de trabajo (WFPM[17]), el cual estima las propiedades termodinámicas de estado a partir de la energía libre de Helmholtz,

[13]Diseño Molecular Asistido por Computadora (CAMD) de sus siglas en inglés: Computer-Assisted Molecular Design [90].

[14]Relación Cuantitativa entre Estructura y Propiedad (QSPR) de sus siglas en inglés: Quantitative Structure–Property Relationship [92].

[15]El descriptor molecular es el resultado final de un procedimiento lógico y matemático que transforma la información química codificada dentro de una representación simbólica de una molécula en un número útil o en el resultado de algún experimento estandarizado [93].

[16]Instituto Nacional de Estándares y Tecnología Departamento de Comercio de los Estados Unidos (NIST) por sus siglas en inglés: National Institute of Standards and Technology U.S Department of Comerce [84].

[17]El Modelo Parametrizado del Fluido de Trabajo (WFPM) por sus siglas en inglés: Working Fluid Parameterized Model [97].

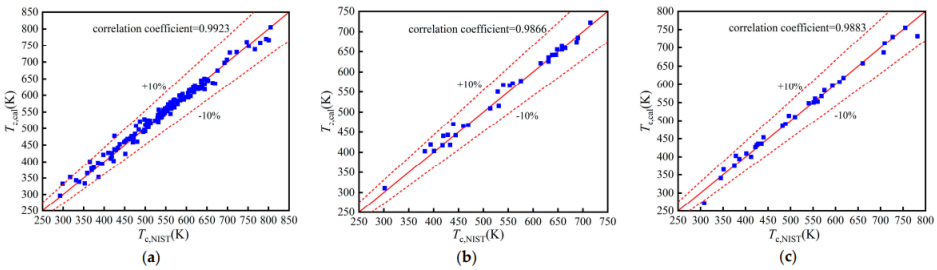


Figura 4.6: Comparación de T_c: los autores comparan los valores de temperatura crítica predichos por el modelo QSPR con datos de referencia (NIST) en tres conjuntos. (a) Entrenamiento , (b) Validación y (c) Prueba. La alta correlación ($R > 0.98$) y la baja dispersión demuestra que el modelo QSPR basado en redes neuronales generaliza adecuadamente, sin sobreajuste, y tiene gran capacidad de predicción. Tomado de Pan et al. [50].

empleando una ecuación de estado de Soave–Redlich–Kwong (SRK [98]) mejorada. WFPM calcula las propiedades residuales y de gas ideal, permitiendo estimar la entalpía y entropía de evaporación, así como la eficiencia térmica del ciclo. La integración de ambos modelos se puede ver en el diagrama de flujo de la Figura 4.7 y da lugar al modelo acoplado denominado por los investigadores como "*QSPR+WFPM*", capaz de predecir el comportamiento termodinámico de un fluido a partir de su estructura molecular.

Para validar este planteamiento, los escritores del artículo seleccionaron cuatro fluidos típicamente usados en ORC (R245fa, R600a, R134a y R1234ze(E)) que no formaban parte del conjunto de entrenamiento. Se compararon las propiedades calculadas por el modelo propuesto con los datos generados por el software de referencia REFPROP, obteniéndose AARD[18] inferiores a 6 % para la eficiencia térmica y menores al 8.44 % para h_{vap} y s_{vap}. Por ejemplo, el modelo predijo con notable precisión la eficiencia térmica de R245fa (AARD = 1.51 %), mientras que para R1234ze(E), el error fue mayor debido a la sobreestimación de T_c. Se observó que errores en la predicción de c_p^0 influían significativamente en h_{vap} y s_{vap}, lo que sugiere sensibilidad del modelo a dichas propiedades. En conjunto, los resultados demostraron que la precisión del modelo "QSPR+WFPM" es aceptable para estimar el desempeño de fluidos tanto conocidos como hipotéticos.

[18]Desviación Relativa Media Absoluta (AARD) por sus siglas en inglés: Absolute Average Relative Deviation. Es medida estadística que se utiliza para evaluar la precisión de un modelo comparando sus predicciones con los valores reales [99].

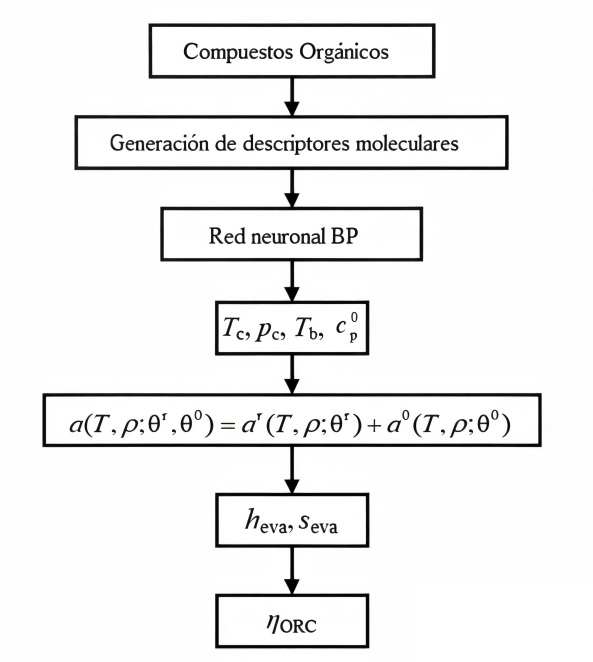


Figura 4.7: Diagrama de Flujo del modelo de acoplamiento "QSPR+WFPM": Se puede resumir en tres etapas clave. 1. Entrada: Estructuras moleculares de compuestos orgánicos convertidas en descriptores moleculares mediante software (AlvaDesc). 2. Predicción QSPR: Una red neuronal (BP) utiliza estos descriptores para predecir propiedades termofísicas clave (T_c, p_c, T_b, c_p^0). 3. Cálculo WFPM: Las propiedades predichas alimentan el modelo termodinámico para estimar parámetros de rendimiento del ORC (h_{eva}, s_{eva}, η). Tomado de pan et al. [50].

Con el fin de maximizar la eficiencia del ORC, se utilizó un algoritmo genético (GA[19]) para optimizar los parámetros de operación del ciclo (temperaturas de evaporación, condensación y sobrecalentamiento) y las propiedades del fluido (T_c, p_c, T_b, c_p^0). La optimización fue llevada a cabo por Pan et al [50]. para dos condiciones de fuentes geotérmicas ($473.15K^\circ$ y $523.15K^\circ$), determinándose las propiedades del fluido ideal que permitiría alcanzar eficiencias térmicas de 13.10 % y 17.59 %, respectivamente. A partir de estas metas, se empleó un enfoque i-QSPR (QSPR inverso) para diseñar nuevos fluidos moleculares que se aproximaran a las propiedades ideales. Se generaron 244 candidatos a partir de seis grupos funcionales comunes ($-CH_2-$, $>C<$, $>C=$, $-F$, $-CH<$, $-H$), restringiendo la longitud de la cadena

[19]Algoritmo Genético (GA) por sus siglas en inglés: Genetic Algorithm. Es un método de búsqueda y optimización que imita la evolución biológica para encontrar soluciones a problemas complejos. Funciona iterando sobre una población de posibles soluciones, seleccionando las mejores, cruzándolas y mutándolas para generar nuevas soluciones, con el objetivo de converger a una solución óptima o cercana a ella [100].

carbonada a cuatro átomos. Las propiedades de cada candidato fueron calculadas por QSPR y su desempeño térmico fue evaluado mediante WFPM.

Durante este proceso, los descriptores moleculares de los candidatos fueron calculados, y sus Tc y pc estimados mediante QSPR. Como lograr una coincidencia exacta con los valores ideales es difícil, los autores introdujeron los parámetros α y β, que representan los errores relativos entre los valores predichos de los candidatos y los valores ideales, respectivamente. Estos valores permiten ajustar el criterio de selección de candidatos, tolerando pequeñas desviaciones respecto al fluido ideal. La Figura 4.8 ilustra gráficamente el proceso de diseño activo de fluidos basado en i-QSPR.

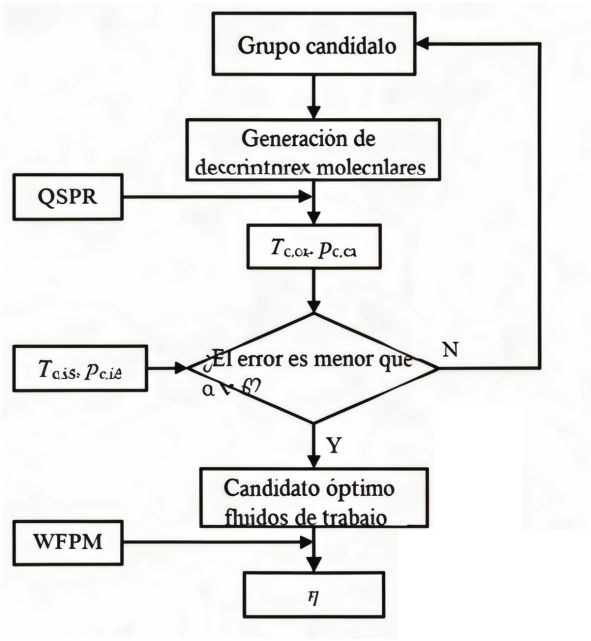


Figura 4.8: Proceso de diseño activo de fluidos de trabajo. Los autores proponen un esquema de dos etapas principales. 1. Predicción de propiedades termofísicas ideales usando GA, y 2. Diseño molecular inverso para encontrar compuestos con propiedades similares, considerando los umbrales definidos por α y β. Tomado de Pan et al. [50].

Los resultados de esta etapa se resumen en las Tablas 4.5 y 4.6.

Entre los candidatos generados, los compuestos $C_3H_4F_2$ y $C_4H_3F_5$ destacaron para los autores como opciones prometedoras, con eficiencias térmicas cercanas a las del fluido ideal. No obstante, sus puntos de ebullición eran superiores a los ideales, lo que limita el rango útil de expansión en la turbina. A pesar de esto, el estudio evidencia

Tabla 4.5: Propiedades termofísicas y eficiencia térmica de los candidatos a una fuente de calor de $473,15K^{\circ}$. Tomado de [57]

Formula química	T_c (K°)	p_c (MPa)	T_b (K°)	c_p^0 $(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$	η (%)
$C_3H_4F_2$	432.52	4.80	294.80	30.63	12.98
$C_3H_3F_3$	429.03	4.36	283.36	60.97	12.83
$C_3H_7F_2$	436.83	4.31	303.06	35.30	12.22

Tabla 4.6: Propiedades termofísicas y eficiencia térmica de los candidatos a una fuente de calor de $523,15K^{\circ}$. Tomado de [57]

Formula química	T_c (K°)	p_c (MPa)	T_b (K°)	c_p^0 $(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$	η (%)
$C_3H_4F_2$	481.50	3.32	318.83	71.34	14.63
$C_3H_3F_3$	481.59	2.90	317.87	133.60	14.61
$C_3H_7F_2$	483.07	3.13	327.02	128.80	13.74

que estas moléculas diseñadas activamente pueden ofrecer alternativas viables y eficientes para aplicaciones ORC. Cabe resaltar que aún no se han considerado aspectos ambientales y de seguridad, los cuales deberán abordarse en investigaciones futuras antes de implementar estos compuestos a nivel industrial.

La metodología propuesta por Pan, Yang F., Zhang, Yan, Yang A., Liung y Yu [50] demuestra que es posible diseñar y evaluar fluidos de trabajo novedosos a partir de su estructura molecular, con alta precisión, sin recurrir a datos experimentales. La integración de QSPR, redes neuronales, modelado termodinámico y optimización evolutiva representa una contribución significativa al desarrollo de ciclos ORC más eficientes y personalizados para fuentes térmicas específicas.

Desde mi perspectiva personal, este artículo científico ofrece una visión fascinante sobre el Ciclo Rankine Orgánico (ORC) al enfocarse en la creación de fluidos de trabajo mediante técnicas computacionales avanzadas. La innovación y el rigor en la investigación se destacan especialmente por la combinación de diferentes métodos computacionales utilizados en este estudio.

El empleo de la computación para diseñar y seleccionar fluidos de trabajo

específicos es particularmente interesante, ya que abre nuevas posibilidades para optimizar la eficiencia y el rendimiento del ciclo. La aplicación de múltiples técnicas computacionales, como simulaciones y modelados moleculares, permite un análisis profundo y detallado de las propiedades termodinámicas y de transferencia de calor de los fluidos de trabajo. Estas técnicas proporcionan una base sólida para entender cómo estos fluidos pueden mejorar la eficiencia energética del ORC.

Además, el estudio es muy exhaustivo, abarcando diversos aspectos críticos del ORC, desde la teoría y el modelado hasta la práctica y la aplicación. Esta exhaustividad no solo refuerza la validez de los hallazgos, sino que también proporciona una base sólida para futuras investigaciones. La combinación de técnicas computacionales avanzadas y métodos estadísticos robustos con un enfoque integral en el diseño de fluidos de trabajo subraya la importancia de la interdisciplinariedad en la optimización de sistemas energéticos.

El artículo también pone de manifiesto cómo la computación puede revolucionar el diseño de sistemas energéticos al permitir la personalización de fluidos de trabajo para condiciones específicas, algo que sería mucho más difícil de lograr mediante métodos experimentales tradicionales. Esta capacidad de adaptar los fluidos de trabajo a las necesidades específicas de cada aplicación del ORC puede conducir a mejoras significativas en la eficiencia energética y la sostenibilidad de estos sistemas.

Este estudio contribuye de manera significativa al conocimiento actual sobre el ORC y también establece un precedente para futuras investigaciones en el diseño de fluidos de trabajo a través de técnicas computacionales avanzadas. La integración de estas técnicas en el análisis y optimización del ORC demuestra el poder de la computación y métodos estadísticos para abordar problemas complejos y mejorar la eficiencia de los sistemas energéticos.

4.5 Optimización Multiobjetivo de un Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) para una Planta Híbrida de Energía Solar y de Residuos (2024):

Este estudio presenta el diseño, modelado y optimización multiobjetivo de una planta híbrida de generación termoeléctrica que combina energía solar de

concentración mediante colectores parabólicos compuestos (PTC[20]) con valorización energética de residuos a través de incineración controlada, utilizando como ciclo de conversión principal un ORC. La Figura 4.9 ilustra el esquema funcional del sistema de cogeneración híbrido propuesto. Esta arquitectura busca mitigar la intermitencia intrínseca de la radiación solar, a la vez que mejora la eficiencia global del sistema mediante la recuperación de calor residual y la integración de un generador termoeléctrico (TEG[21]), el cual reemplaza el condensador convencional del ORC, *incrementando así la densidad de potencia del ciclo* en palabras de los autores.

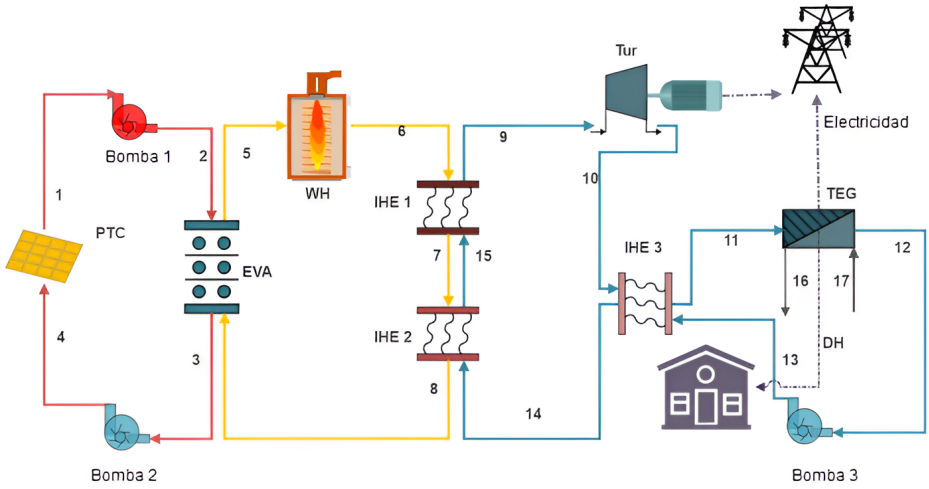


Figura 4.9: Esquema del sistema híbrido de cogeneración: La energía solar térmica es captado por los PTC, y transferido al fluido térmico Dowtherm A [103] (1–2), que alimenta un evaporador acoplado al subsistema de incineración de residuos (WI[22]) (3–6) mediante Therminol VP-1 [104]. Este calor combinado se utiliza para evaporar y sobrecalentar Tolueno en el ORC (9–10), el cual se expande en la turbina. Posteriormente, el calor residual es aprovechado por un TEG (11–12), mejorando la eficiencia global. El excedente térmico se utiliza para calefacción residencial (16). El sistema opera mediante tres bombas de recirculación y tres intercambiadores de calor, con nodos numerados que indican los estados clave para el análisis energético y exergético.. Tomado de Wangan et al. [105].

El sistema fue modelado y simulado termodinámicamente por Wang et al. utilizando Engineering Equation Solver (EES [106]), seleccionando Dowtherm A, Therminol VP-1 y Tolueno como fluidos de trabajo para los subsistemas solar, de incineración y ORC, respectivamente. El análisis termodinámico incluyó balances de energía y exergía, priorizando la evaluación de las fracciones útiles de energía (energía física y química). Formularon balances exergéticos por componente para cuantificar la

[20]Colector Cilindro-Parabólico (PTC) de sus siglas en inglés: Parabolic Trough Collector [101]
[21]Generador Termoeléctrico (TEG) por sus siglas en inglés: Thermoelectric Generator [102].

destrucción de exergía, permitiendo así diagnosticar las irreversibilidades internas del sistema.

El núcleo de la optimización se centró en dos funciones objetivo contrapuestas: la eficiencia exergética del sistema [107] (η_{ex}) y el costo horario total de inversión y operación ($\dot{Z}_{tot}$). Para abordar esta problemática multiobjetivo, Wang et al. implementaron un enfoque híbrido basado en redes neuronales artificiales (ANN[23]) y el algoritmo genético de segunda generación por ordenamiento no dominado (NSGA-II[24]).

El NSGA-II es un algoritmo evolutivo ampliamente utilizado para resolver problemas con múltiples objetivos en conflicto [109], ya que permite generar una frontera de Pareto[25]. Por su parte, las ANN son modelos computacionales inspirados en el funcionamiento del cerebro humano, capaces de aprender relaciones no lineales complejas a partir datos [108]. En este estudio, el NSGA-II exploró el espacio de decisión mediante operadores genéticos clásicos (GA) [100], generando soluciones distribuidas sobre la frontera de Pareto. Para reducir el elevado costo computacional asociado a las simulaciones termoenergéticas detalladas, se entrenó una ANN con 1000 muestras de datos generados mediante simulación.

Previo al proceso de optimización, los autores desarrollaron un análisis paramétrico para identificar las variables decisivas que influencian significativamente η_{ex} y $\dot{Z}_{tot}$. Los parámetros más sensibles fueron: el área total de los colectores solares (A_{tot}), la temperatura de entrada al evaporador solar (T_2), la temperatura de entrada a la turbina (T_9) y la temperatura de salida del fluido térmico en la unidad de incineración (T_6). El estudio reveló que η_{ex} aumenta con A_{tot}, T_6 y T_9, mientras que decrece con T_2. Estos parámetros fueron utilizados por Wang et al. como variables de decisión en el algoritmo NSGA-II. Como resultado, se obtuvo un conjunto de soluciones óptimas representado mediante una frontera de Pareto, ilustrada en la Figura 4.10, en este contexto, la frontera de Pareto define el conjunto de soluciones no

[23]Red Neuronal Artificial (ANN) por sus siglas en inglés: Artificial Neural Network [108].

[24]Algoritmo Genético de Ordenamiento no Dominado II (NSGA-II) por sus siglas en inglés: Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II [109].

[25]La frontera de Pareto hace referencia a un concepto en la optimización multiobjetivo, es el conjunto de todas las soluciones no dominadas. Son las configuraciones para las cuales no existe ninguna otra alternativa que sea superior de forma simultánea en todos los criterios considerados [110].

dominadas en las que no es posible mejorar un objetivo (η_{ex}) sin empeorar el otro ($\dot{Z}_{tot}$). El ANN se integró al proceso de optimización como metamodelo predictivo, reemplazando las evaluaciones directas y reduciendo el tiempo total de cálculo de 10 horas a tan solo 5 minutos.

Para la toma de decisiones dentro del espacio de soluciones óptimas, se aplicó la técnica TOPSIS[26], que permite identificar la alternativa más cercana al punto ideal mediante el cálculo de distancias euclidianas ponderadas en el espacio de criterios.

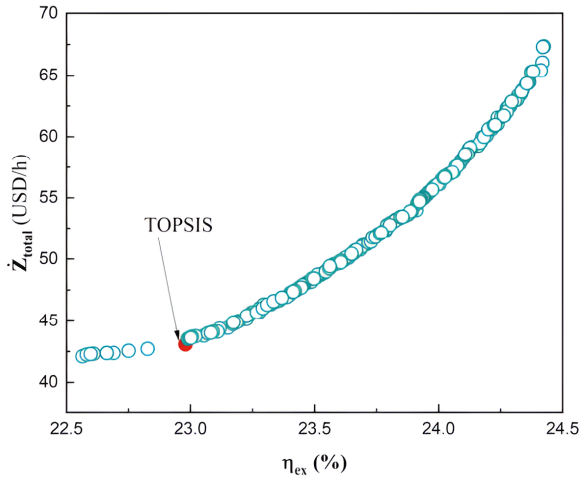


Figura 4.10: Los puntos óptimos del sistema (frontera de Pareto): Cada punto en esta curva representa un compromiso técnico-económico entre maximizar la calidad del aprovechamiento energético y minimizar los costos operativos del sistema, al aumentar la eficiencia exergética también se incrementa el costo horario, debido al mayor requerimiento de superficie colectora o de temperaturas de operación más elevadas. Tomado de Wang et al. [105].

La solución óptima identificada por TOPSIS se visualiza en la Tabla 4.7. Este método identifica la solución más cercana al ideal, donde el ideal representa máxima eficiencia exergética con mínimo costo horario total, la combinación óptima alcanzada revela un balance tecnoeconómico significativo, los autores logran una eficiencia exergética cercana al 23 % con un costo operativo moderado.

El análisis económico es mostrado en la Figura 4.11 la cual ilustra la distribución del costo por hora para cada componente del sistema. Este resultado sugiere que futuras investigaciones deberían centrarse en la reducción de costos del subsistema solar, ya sea

[26]Técnica de Preferencia de Orden por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS) por sus siglas en inglés: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution [111].

Tabla 4.7: Los detalles relevantes del punto TOPSIS. Tomado de Wang et al. [105]

Parámetros	**Valor TOPSIS**
T_9 $(C°)$	279.83
T_2 $(C°)$	348.27
T_6 $(C°)$	394.33
A_{tot} (m^2)	5705.82
η_{ex} $(\%)$	22.98
$\dot{Z}_{tot}$ (USD/h)	43.08

mediante la optimización de los fluidos de trabajo, la integración de nanofluidos o el rediseño estructural de los colectores.

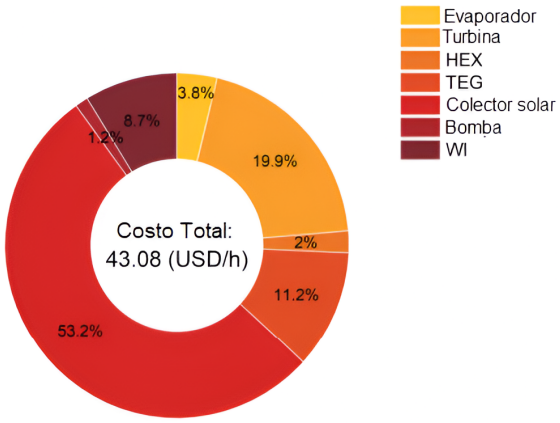


Figura 4.11: El colector solar representa el componente de mayor peso económico, con un 53.2 % del costo total (USD 22.9/h), seguido por la turbina con 19.9 %, el TEG 11.2 % y la unidad de incineración 8.7 %. Tomado de Wang et al. [105].

El trabajo demuestra la viabilidad técnica, económica y termodinámica de una planta híbrida solar-residuos optimizada mediante herramientas avanzadas de inteligencia artificial y algoritmos evolutivos. El uso combinado de ANN, NSGA-II y TOPSIS permite resolver de manera eficiente problemas complejos de diseño y operación en sistemas energéticos multivariables, promoviendo una transición hacia esquemas de generación más sostenibles y resilientes, con alto aprovechamiento de la energía útil disponible y una significativa reducción en el impacto ambiental asociado.

Desde una perspectiva personal, este artículo científico publicado recientemente marca un hito significativo en la investigación del Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) gracias a su sistema avanzado que integra modelado, análisis, optimización y toma de

decisiones mediante redes neuronales. Este enfoque integrado aprovecha al máximo las investigaciones previas, consolidando conocimientos y técnicas para ofrecer resultados excepcionales. La capacidad de combinar estas diversas áreas demuestra un nivel de innovación y rigor que es esencial para avanzar en la tecnología del ORC.

El sistema propuesto no solo muestra una gran innovación al incorporar redes neuronales para la optimización y toma de decisiones, sino que también demuestra su eficacia a través de resultados sobresalientes. Este avance permite ajustar con precisión los parámetros operativos del ORC, maximizando el rendimiento del sistema y garantizando una mayor eficiencia. La implementación de redes neuronales proporciona una herramienta poderosa para abordar la complejidad de los sistemas energéticos, destacando la importancia de las tecnologías emergentes en la mejora de la sostenibilidad energética.

La investigación destaca por su capacidad para contextualizar todos los aspectos del ORC en un entorno realista, abarcando desde la teoría hasta la práctica, incluidos los costos de aplicación. Esta capacidad de situar el ORC dentro de un contexto práctico y económico es crucial para evaluar su viabilidad y potencial de implementación a gran escala. El artículo subraya cómo el uso de modelado y análisis de datos puede mejorar significativamente la eficiencia y la viabilidad económica del ORC, ofreciendo una perspectiva detallada y fundamentada sobre las posibilidades de esta tecnología.

Además, este estudio no solo se basa en los avances previos en la investigación del ORC, sino que también los amplía significativamente mediante la aplicación de técnicas de vanguardia como las redes neuronales. Este enfoque completo y detallado ofrece una contribución valiosa y novedosa al campo, estableciendo un nuevo estándar en la investigación y desarrollo de la tecnología ORC. La capacidad de integrar y optimizar diversos aspectos del ciclo mediante tecnologías avanzadas demuestra el potencial de la innovación tecnológica para transformar los sistemas energéticos sostenibles.

El artículo representa una contribución significativa a la investigación del ORC, destacando la importancia de la innovación y la integración de tecnologías avanzadas para la optimización de sistemas energéticos. La aplicación de redes neuronales y técnicas de modelado avanzado no solo mejora la eficiencia y viabilidad del ORC, sino que también establece una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en

este campo. Esta investigación subraya la importancia de un enfoque integral y multidisciplinario en la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles y eficientes.

5. Conclusiones

La presente monografía de compilación ha demostrado que la integración de técnicas de análisis de datos y Big Data en la optimización del Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) constituye un avance considerable en la búsqueda de sistemas energéticos más eficientes, sostenibles y adaptables. La revisión completa de cinco trabajos de investigacion recientes permitió evidenciar cómo estos recursos han transformado la forma en que se diseñan, operan y analizan los sistemas ORC.

Entre los hallazgos más destacados se encuentra la capacidad de modelos como QSPR+WFPM para predecir propiedades termofísicas con alta precisión a partir de la estructura molecular, permitiendo así el diseño racional de fluidos específicos para condiciones operativas concretas. Este enfoque activo supera las limitaciones de métodos tradicionales y abre nuevas posibilidades en la creación de compuestos más eficientes y ambientalmente responsables. Paralelamente, estudios como el de Castelli et al. (2019) evidencian que algoritmos evolutivos como PGS-COM pueden alcanzar eficiencias exergéticas superiores al 85 %, mientras que el uso de mezclas zeotrópicas optimiza la adaptación térmica del ciclo, a pesar de sus retos operativos y de seguridad.

En cuanto a su aplicación, el ORC se perfila como una tecnología clave para la valorización de calor residual en sectores con alto consumo energético, como la industria del aluminio, donde aproximadamente el 50 % de la energía se pierde en forma de calor. Su acoplamiento con fuentes renovables como la energía solar y geotérmica refuerza su relevancia estratégica en el contexto de la transición energética. La implementación de fluidos como el HFE-7000 o el RE347mcc, que combinan eficiencia térmica y bajo impacto ambiental, resaltan el compromiso hacia soluciones sostenibles.

Además, la innovación tecnológica se refleja en la integración del ORC con sistemas híbridos avanzados que incluyen colectores solares, generadores termoeléctricos y almacenamiento térmico. Estos diseños, optimizados mediante técnicas como NSGA-II y redes neuronales artificiales (ANN), mitigan la intermitencia de las fuentes renovables y maximizan la densidad de potencia y el rendimiento global

del sistema. En este contexto, el análisis de patentes revela un liderazgo creciente, particularmente por parte de China, lo que destaca la necesidad de fomentar la cooperación internacional y el intercambio de conocimiento tecnológico.

En el plano metodológico, la ciencia de datos ha permitido superar las restricciones de los modelos clásicos, proporcionando herramientas que mejoran la toma de decisiones, reducen costos operativos y elevan la confiabilidad del diseño. Desde hojas de cálculo hasta arquitecturas neuronales profundas, estas técnicas han ampliado las capacidades analíticas del investigador.

El Ciclo Orgánico de Rankine, fortalecido por la sinergia entre ciencia de datos y desarrollo tecnológico, surge como una solucion flexible con gran potencial para afrontar los desafíos energéticos contemporáneos. No obstante, su implementación a gran escala exige superar barreras técnicas, validar experimentalmente los avances simulados y asegurar su escalabilidad económica. Futuras investigaciones deberán explorar el potencial de integración con tecnologías emergentes. Así, el ORC no solo representa una solución viable desde el punto de vista técnico, sino un eje estratégico en la construcción de un sistema energético más sólido, limpio y sustentable.

6. Recomendaciones

6.1 Desafíos

6.1.1 Dependencia de los Combustibles Fósiles

Hoy en día, la demanda mundial de energía se satisface predominantemente con combustibles fósiles, que son finitos y contribuyen significativamente a la degradación ambiental. El agotamiento de estos recursos requiere un cambio hacia fuentes de energía renovables y un uso más eficiente de los recursos energéticos existentes. Una técnica prometedora para abordar este problema es el Ciclo Orgánico de Rankine (ORC). Sin embargo, la adopción generalizada de la tecnología ORC enfrenta varios desafíos, incluida la necesidad de materiales y tecnologías avanzados para optimizar la eficiencia y reducir costos [112].

6.1.2 Diseño de Intercambiador de Calor

Un componente crítico de un sistema ORC es el intercambiador de calor. Los modelos de diseño general y de alta precisión de intercambiadores de calor son esenciales para la aplicación más amplia de la tecnología ORC. Durante el proceso de diseño, es crucial considerar simultáneamente el desempeño económico, las respuestas dinámicas y el desempeño fuera de diseño de los intercambiadores de calor. Además, son particularmente necesarios modelos dinámicos que reflejen con precisión las características operativas fuera de diseño. Mejorar la precisión de estos modelos sigue siendo un desafío técnico importante que debe abordarse para que el ORC logre un rendimiento óptimo en diferentes condiciones operativas [113].

6.1.3 Barreras Tecnológicas

Las barreras tecnológicas continúan obstaculizando la adopción generalizada de sistemas ORC. Estos incluyen la necesidad de investigación avanzada sobre nuevos

fluidos de trabajo y las complejidades de la dinámica de los gases en vapores densos y flujos de fluidos supercríticos de sustancias orgánicas. Las investigaciones fundamentales en estas áreas han allanado el camino para mejoras altamente innovadoras, pero superar estas barreras requiere una inversión sostenida en investigación y desarrollo para ampliar los límites de la tecnología ORC actual [114].

6.2 Oportunidades

6.2.1 Integración De Energías Renovables

El ORC ofrece una solución prometedora para integrar fuentes de energía renovables en la red eléctrica. Al utilizar calor de baja calidad procedente de fuentes solares, geotérmicas y de calor residual, el ORC puede mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los proyectos de energía renovable. Se debe facilitar y fomentar la inversión en energía renovable por parte del sector privado, ya que puede conducir al desarrollo de sistemas basados en ORC que aprovechen el potencial de la energía de las olas para la generación de energía a pequeña escala en zonas costeras rurales [115].

6.2.2 Investigaciones y Desarrollos Innovadores

El campo de ORC está lleno de oportunidades para la innovación. La investigación científica y técnica continua, especialmente en las áreas de nuevos fluidos de trabajo y diseños avanzados de intercambiadores de calor, puede conducir a mejoras significativas en el rendimiento. Los estudios centrados en la compleja dinámica de los gases de vapores densos y flujos de fluidos supercríticos son particularmente prometedores. Estas áreas de investigación no solo abordan los desafíos existentes, sino que también abren nuevas vías para mejorar la eficiencia y aplicabilidad de los sistemas ORC en diversos sectores industriales [114].

6.2.3 Beneficios Económicos y Ambientales

La adopción de sistemas ORC puede proporcionar importantes beneficios económicos y ambientales. Al mejorar la eficiencia de los procesos de conversión de

energía, los sistemas ORC pueden reducir los costos operativos y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto los convierte en una opción atractiva para las industrias que buscan minimizar su huella ambiental manteniendo al mismo tiempo la viabilidad económica. Además, el desarrollo de sistemas ORC rentables puede estimular la inversión en tecnologías verdes, impulsando el crecimiento económico y fomentando el desarrollo sostenible [112].

Referencias

[1] Science and Technology and Technology: Biographies, "William John Macquorn rankine." https://www.encyclopedia.com/people/science-and-technology/technology-biographies/william-john-macquorn-rankine. Accedido: 2025.

[2] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons, 2010.

[3] J. R. Howell and R. O. Buckius, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1st ed., January 1987.

[4] Oriol Planas-Technical Industrial Engineer, "William John Macquorn Rankine: biography and contributions." https://solar-energy.technology/thermodynamics/history-of-thermodynamics/william-john-macquorn-rankine, Feb. 2020. Accedido: 2025.

[5] N. Connor, "What is rankine cycle - steam turbine cycle - definition." https://www.thermal-engineering.org/what-is-rankine-cycle-steam-turbine-cycle-definition/, May 2019. Accedido: 2025.

[6] A. Mahmoudi, M. Fazli, and M. R. Morad, "A recent review of waste heat recovery by organic Rankine cycle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 143, pp. 660–675, October 2018. Analyzes 150+ studies from 2010-2017.

[7] E. Macchi and M. Astolfi, *Organic Rankine Cycle (ORC) power systems: Technologies and Applications*. Woodhead Publishing, 2016.

[8] P. Lauenburg, "11 - temperature optimization in district heating systems," in *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems* (R. Wiltshire, ed.), Woodhead Publishing Series in Energy, pp. 223–240, Oxford: Woodhead Publishing, 2016.

[9] M. F. Qureshi, M. W. Chandio, A. A. Memon, L. Kumar, and M. M. Awad, "Thermal analysis of solar energy based organic rankine cycle cascaded with vapor compression refrigeration cycle," *Energy Nexus*, vol. 14, p. 100291, July 2024.

[10] K. Aouane, O. Sandre, I. J. Ford, T. P. Elson, and C. Nightingale, "Thermogravitational cycles: Theoretical framework and example of an electric thermogravitational generator based on balloon inflation/deflation," *Inventions*, vol. 3, p. 79, Nov. 2018.

[11] G. Biancini, L. Cioccolanti, R. Moradi, and M. Moglie, "Comparative study of steam, organic rankine cycle and supercritical CO2 power plants integrated with residual municipal solid waste gasification for district heating and cooling," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 241, p. 122437, Mar. 2024.

[12] L. M. Vonk, "Working fluid selection for a diesel engine waste heat recovery ORC module," vol. 2, 2018. Tesis de Maestría.

[13] P. Lu, Z. Liang, X. Luo, Y. Xia, J. Wang, K. Chen, Y. Liang, J. Chen, Z. Yang, J. He, and Y. Chen, "Design and optimization of organic rankine cycle based on heat transfer enhancement and novel heat exchanger: A review," *Energies*, vol. 16, p. 1380, Jan. 2023.

[14] G. Ou, Z. Zhu, B. Dong, and W. E, *Introduction to Data Science*. Singapore: World Scientific Publishing, December 2023. Authors affiliated with Beijing Institute of Big Data Research and Peking University.

[15] W. Cleveland, "Data science: An action plan for expanding the technical areas of the field of statistics," *International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique*, vol. 69, 03 2001.

[16] J. Oyekale and B. Oreko, "Machine learning for design and optimization of organic rankine cycle plants: A review of current status and future perspectives," *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.*, Apr. 2023.

[17] K. Rattanaopas, S. Kaewkeerat, and Y. Chuchuen, "A comparison of ORC-compress performance with big data workload on virtualization," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 855, pp. 153–158, Oct. 2016.

[18] X. Zhang, X. Wang, P. Yuan, H. Tian, and G. Shu, *Optimizing Hybrid Electric Vehicle Coupling Organic Rankine Cycle Energy Management Strategy via Deep Reinforcement Learning*, vol. 15. Elsevier, March 2024.

[19] X. Ping, F. Yang, H. Zhang, C. Xing, A. Yang, and Y. Wang, "An efficient multilayer adaptive self-organizing modeling methodology for improving the generalization ability of organic rankine cycle (ORC) data-driven model," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 126, p. 106744, Nov. 2023.

[20] I. A. Rauf, *Physics of Data Science and Machine Learning*. CRC Press, 2021.

[21] L. Lista, *Statistical Methods for Data Analysis: With Applications in Particle Physics*. Springer Nature, 2023.

[22] D. Adytia, A. L. Latifah, D. Saepudin, D. Tarwidi, S. R. Pudjaprasetya, S. Husrin, A. Sopaheluwakan, and G. Prasetya, "A deep learning approach for wind downscaling using spatially correlated global wind data," *International Journal of Data Science and Analytics*, vol. 18, pp. 1–15, September 2024.

[23] S. S. Abdul-Jabbar and A. K. Farhan, "Data analytics and techniques," *ARO-Sci. J. Koya Univ.*, vol. 10, pp. 45–55, Oct. 2022.

[24] Z. Ke, Q. Zou, J. Liu, and S. Qian, "Real-time system optimal traffic routing under uncertainties – can physics models boost reinforcement learning?," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, July 2024. En revisión, preimpresión arXiv.

[25] I. C. Nitu, *Data science for the study of gravitational waves with high precision pulsar timing. (Doctoral dissertation)*. Manchester U, 2024.

[26] D. George and E. A. Huerta, "Deep neural networks to enable real-time multimessenger astrophysics," *Physical Review D*, vol. 97, p. 044039, February 2018.

[27] A. E. Koloniari, E. C. Koursoumpa, P. Nousi, P. Lampropoulos, N. Passalis, A. Tefas, and N. Stergioulas, "New gravitational wave discoveries enabled by machine learning," *Nature Astronomy (Submitted)*, July 2024. En revisión.

[28] Y.-P. Lin, W.-H. Wang, S.-Y. Pan, C.-C. Ho, C.-J. Hou, and P.-C. Chiang, "Environmental impacts and benefits of organic rankine cycle power generation technology and wood pellet fuel exemplified by electric arc furnace steel industry," *Appl. Energy*, vol. 183, pp. 369–379, Dec. 2016.

[29] H. Zhang, R. Hao, X. Liu, N. Zhang, W. Guo, Z. Zhang, C. Liu, Y. Liu, C. Duan, and J. Qin, "Thermodynamic performance analysis of an improved coal-fired power generation system coupled with geothermal energy based on organic rankine cycle," *Renew. Energy*, vol. 201, pp. 273–290, Dec. 2022.

[30] L. Zhang, M. Du, X. Bai, Y. Chen, and D. Zhang, "Complex-valued physics-informed machine learning for efficient solving of quintic nonlinear Schrödinger equations," *Physical Review Research*, vol. 7, p. 013164, Feb 2025.

[31] R. Jaafari and A. B. Rahimi, "Determination of optimum organic rankine cycle parameters and configuration for utilizing waste heat in the steel industry as a driver of receive osmosis system," *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 4146–4171, Nov. 2021.

[32] M. A. B. Yunus A. Cengel, "Thermodynamics : an engineering approach," 2008.

[33] M. A. Rosen, "Exergy analysis of energy systems," in *Encyclopedia of Energy* (C. J. Cleveland, ed.), vol. 2 of *Encyclopedia of Energy*, pp. 607–621, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2004. Part of 6-volume reference work.

[34] X. Zhang, L. Wu, X. Wang, and G. Ju, "Comparative study of waste heat steam SRC, ORC and S-ORC power generation systems in medium-low temperature," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 106, pp. 1427–1439, Aug. 2016.

[35] K. Rahbar, S. Mahmoud, R. K. Al-Dadah, N. Moazami, and S. A. Mirhadizadeh, "Review of organic rankine cycle for small-scale applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 134, pp. 135–155, Feb. 2017.

[36] C. E. R. P. D. E. . D. M. Galanis, N., "Electricity generation from low temperature sources," *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 2, July 2009.

[37] L. Wang, J. Yang, B. Qu, and C. Pang, "Multi-objective optimization of an organic rankine cycle (ORC) for a hybrid solar–waste energy plant," *Energies*, vol. 17, p. 1810, Apr. 2024.

[38] T. Yamamoto, T. Furuhata, N. Arai, and K. Mori, "Design and testing of the organic rankine cycle," *Energy (Oxf.)*, vol. 26, pp. 239–251, Mar. 2001.

[39] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw Hill, 2006.

[40] P. Ungerer, C. Nieto-Draghi, B. Rousseau, G. Ahunbay, and V. Lachet, "Molecular simulation of the thermophysical properties of fluids: From understanding toward quantitative predictions," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 134, no. 1, pp. 71–89, 2007. EMLG/JMLG 2005 Special Issue.

[41] J. B. Durkee, "Chapter 2 - enclosed vapor degreasers," in *Cleaning with Solvents: Methods and Machinery* (J. B. Durkee, ed.), pp. 67–112, Oxford: William Andrew Publishing, 2014.

[42] C. Chen and R. Wakelin, "Conceptual design of cost-effective and environmentally-friendly configurations for an integrated industrial complex," in *12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, Computer aided chemical engineering, pp. 2003–2008, Elsevier, 2015.

[43] H. E. Gsponer, "Termoquímica: validez de la definición del cambio de entalpía aplicado a una reacción química," *Educ. quím.*, vol. 23, pp. 45–48, Jan. 2012.

[44] G. J. Van Wylen and R. E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*. New York: John Wiley & Sons, 3rd ed., 1985. Section 2.1.

[45] C. Y. Yan, "5.2 mass and energy conservation equations in a control volume." `https://www.thermal-engineering.org/what-is-rankine-cycle-steam-turbine-cycle-definition/`, May 2019. Accedido: 2025.

[46] E. Wang, C. N. Markides, Y. Lu, and V. Lemort, "Editorial: Organic rankine cycle for efficiency improvement of industrial processes and urban systems," *Frontiers in Energy Research*, vol. Volume 8 - 2020, 2020.

[47] W. W. Husband and A. Beyene, "Low-grade heat-driven rankine cycle, a feasibility study," *International Journal Of Energy Research*, vol. 32, pp. 1373–1382, July 2008.

[48] T. M. I. Mahlia, H. Syaheed, A. E. P. Abas, F. Kusumo, A. H. Shamsuddin, H. C. Ong, and M. R. Bilad, "Organic rankine cycle (orc) system applications for solar energy: Recent technological advances," *Energies*, vol. 12, p. 2930, July 2019.

[49] A. F. Castelli, C. Elsido, R. Scaccabarozzi, L. O. Nord, and E. Martelli, "Optimization of organic rankine cycles for waste heat recovery from aluminum production plants," *Frontiers In Energy Research*, vol. 7, June 2019.

[50] Y. Pan, F. Yang, H. Zhang, Y. Yan, A. Yang, J. Liang, and M. Yu, "Performance prediction and working fluid active design of organic rankine cycle based on molecular structure," *Energies*, vol. 15, p. 8160, Nov. 2022.

[51] A. Kribus, D. Kaftori, G. Mittelman, A. Hirshfeld, Y. Flitsanov, and A. Dayan, "A miniature concentrating photovoltaic and thermal system," *Energy Conversion And Management*, vol. 47, no. 20, pp. 3582–3590, 2006.

[52] *Refrigerants*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2004. Available from: `http://www.ashrae.org/publications/` (February 2007).

[53] NASA Goddard Space Flight Center, "Equivalent effective stratospheric chlorine (EESC): Scientific background and data," 2023.

[54] M. J. Calm and G. C. Hourahan, "Refrigerant data summary," *Engineering Systems*, vol. 18, pp. 74–88, November 2001.

[55] U.S. Environmental Protection Agency, "Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks," April 2020.

[56] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "ASHRAE Fact Sheet." ASHRAE, November 2022. Accedido: 2025.

[57] 3M Company, *3M Novec™ 7000 Engineered Fluid*. 3M, 98-0212-2499-7 ed., 2005. Available from: `www.3M.com/electronics` (Accedido February 2007).

[58] R. Loni, A. B. Kasaeian, E. Askari Asli-Ardeh, and B. Ghobadian, "Optimizing the efficiency of a solar receiver with tubular cylindrical cavity for a solar-powered organic rankine cycle," *Energy*, vol. 112, pp. 1259–1272, 2016.

[59] V. R. Patil, V. I. Biradar, R. Shreyas, P. Garg, M. S. Orosz, and N. C. Thirumalai, "Techno-economic comparison of solar organic rankine cycle (orc) and photovoltaic (pv) systems with energy storage," *Renewable Energy*, vol. 113, pp. 1250–1260, 2017.

[60] M. I. R. Serrano, *Concentrating Solar Thermal Technologies*. Springer, 2019. Accedido: 30 April 2019.

[61] F. A. Boyaghchi and A. Sohbatloo, "Assessment and optimization of a novel solar driven natural gas liquefaction based on cascade ORC integrated with linear Fresnel collectors," *Energy Conversion and Management*, vol. 162, pp. 77–89, 2018.

[62] Clarivate Analytics, "Derwent innovation." Patent Analytics Platform, 2018.

[63] G. Bel and S. Joseph, "Climate change mitigation and the role of technological change: Impact on selected headline targets of Europe's 2020 climate and energy package," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3798–3807, February 2018.

[64] Z. Ghaffarpour, M. Mahmoudi, A. H. Mosaffa, and L. Garousi Farshi, "Thermoeconomic assessment of a novel integrated biomass based power generation system including gas turbine cycle, solid oxide fuel cell and Rankine cycle," *Energy Conversion and Management*, vol. 161, pp. 1–12, 2018.

[65] N. Hamzah, K. Tokimatsu, and K. Yoshikawa, "Prospective for power generation of solid fuel from hydrothermal treatment of biomass and waste in Malaysia," in *Energy Procedia*, vol. 142, (Amsterdam, The Netherlands), pp. 369–373, Elsevier, 2017.

[66] A. Mardoyan and P. Braun, "Analysis of Czech subsidies for solid biofuels," *International Journal of Green Energy*, vol. 12, no. 4, pp. 405–408, 2015.

[67] M. Ak, E. Kentel, and S. Şavaşaneril, "Operating policies for energy generation and revenue management in single-reservoir hydropower systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 1253–1261, 2017.

[68] A. Zerrahn, "Wind power and externalities," *Ecological Economics*, vol. 141, pp. 245–260, 2017.

[69] K. Koyama, "Nuclear power generation," *Yosetsu Gakkai Shi/Journal of the Japan Welding Society*, vol. 83, pp. 23–28, 2014.

[70] M. S. Ismail, M. Moghavvemi, and T. M. I. Mahlia, "Genetic algorithm based optimization on modeling and design of hybrid renewable energy systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 85, pp. 120–130, 2014.

[71] M. Hanif, T. M. I. Mahlia, H. B. Aditiya, and M. S. A. Bakar, "Energy and environmental assessments of bioethanol production from Sri Kanji 1 cassava in Malaysia," *Biofuel Research Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 537–544, 2017.

[72] S. T. Latibari, M. Mehrali, M. Mehrali, T. M. I. Mahlia, and H. S. C. Metselaar, "Synthesis, characterization and thermal properties of nanoencapsulated phase change materials via sol-gel method," *Energy*, vol. 61, pp. 664–672, 2013.

[73] M. Burhan and S. K. Jain, "Tools for search, analysis and management of patent portfolios," *DESIDOC Journal of Library and Information Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 204–213, 2012.

[74] D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, D. G. Altman, and The PRISMA Group, "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement," *PLOS Medicine*, vol. 6, p. e1000097, July 2009.

[75] L. Jing, P. Gang, G. Guangtao, R. Xiao, and J. Ji, "Solar energy overlapping rankine cycle power generation system with different exothermic modes," March 2018. Chinese Patent.

[76] Y. Zhang, C. Zhang, and S. Huang, "Combined solar thermal power generation system," March 2018. U.S. Patent Application.

[77] M. Zheng and K. Zhang, "Photovoltaic and photo-thermal coupled thermoelectric generation system and method," August 2018. Chinese Patent.

[78] R. Xu, M. Yang, Y. Li, S. Xu, R. Wang, and H. Wang, "Organic rankine cycle power generation device and flow path control method for heat collecting fluid," January 2017. Chinese Patent.

[79] T. Liu, J. Wang, X. Yang, and M. Gong, "A review of pulse electrolysis for efficient energy conversion and chemical production," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 59, pp. 69–82, 2021.

[80] A. Solheim, "Inert anodes—the blind alley to environmental friendliness?," in *Light Metals 2018* (O. Martin, ed.), The Minerals, Metals & Materials Series, (Cham), pp. 1253–1260, Springer International Publishing, 2018. Presented at TMS 2018.

[81] K. Mistry and J. Lienhard, "An economics-based second law efficiency," *Entropy*, vol. 15, pp. 2736–2765, July 2013.

[82] E. Martelli and E. Amaldi, "PGS-COM: A hybrid method for constrained non-smooth black-box optimization problems. brief review, novel algorithm and comparative evaluation," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 63, pp. 108–139, 2014.

[83] R. Scaccabarozzi, M. Tavano, C. M. Invernizzi, and E. Martelli, "Comparison of working fluids and cycle optimization for heat recovery ORCs from large internal combustion engines," *Energy*, vol. 158, pp. 396–416, 2018.

[84] E. W. Lemmon, M. L. Huber, and M. O. McLinden, *NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties–REFPROP*. Gaithersburg, Maryland, version 9.1 ed., 2013. Standard Reference Data Program.

[85] B. Kalitventzeff and F. Maréchal, "Targeting the optimal integration of steam networks: Mathematical tools and methodology," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 23, pp. S133–S136, 1999.

[86] A. I. Papadopoulos, M. Stijepovic, and P. Linke, "On the systematic design and selection of optimal working fluids for organic Rankine cycles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 760–769, May 2010.

[87] B. Hu, J. J. Guo, Y. Yang, and Y. Y. Shao, "Selection of working fluid for organic Rankine cycle used in low temperature geothermal power plant," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 179–186, 2022.

[88] S. Quoilin, S. Declaye, B. F. Tchanche, and V. Lemort, "Thermo-economic optimization of waste heat recovery organic Rankine cycles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 14-15, pp. 2885–2893, 2011.

[89] X. Ping, F. B. Yang, H. G. Zhang, C. D. Xing, C. Y. Wang, W. J. Zhang, and Y. Wang, "Energy, economic and environmental dynamic response characteristics of organic Rankine cycle (ORC) system under different driving cycles," *Energy*, vol. 246, p. 123438, 2022.

[90] H. Frühbeis, R. Klein, and H. Wallmeier, "Computer-assisted molecular design (camd)—an overview," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 26, pp. 403–418, May 1987.

[91] W. Su, L. Zhao, and S. Deng, "Developing a performance evaluation model of organic Rankine cycle for working fluids based on the group contribution method," *Energy Conversion and Management*, vol. 132, pp. 307–315, 2017.

[92] D. Abooali and M. A. Sobati, "Novel method for prediction of normal boiling point and enthalpy of vaporization at normal boiling point of pure refrigerants: A QSPR approach," *International Journal of Refrigeration*, vol. 40, pp. 282–293, 2014.

[93] R. Todeschini and V. Consonni, *Handbook of Molecular Descriptors*, vol. 11 of *Methods and Principles in Medicinal Chemistry*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2000. Volume 11 in the series.

[94] Alvascience, "Alvadesc," 2022. Software de cálculo de descriptor molecular.

[95] M. Moosavi, E. Sedghamiz, and M. Abareshi, "Liquid density prediction of five different classes of refrigerant systems (HCFCs, HFCs, HFEs, PFAs and PFAAs) using the artificial neural network-group contribution method," *International Journal of Refrigeration*, vol. 48, pp. 188–200, 2014.

[96] A. Hemmati-Sarapardeh, A. Larestani, M. Nait Amar, and S. Hajirezaie, "Chapter 3 - training and optimization algorithms," in *Applications of Artificial Intelligence Techniques in the Petroleum Industry* (A. Hemmati-Sarapardeh, A. Larestani, M. Nait Amar, and S. Hajirezaie, eds.), pp. 51–78, Gulf Professional Publishing, 2020.

[97] F.-F. Yang, F.-B. Yang, Q.-Q. Chu, Q. Liu, Z. Yang, and Y.-Y. Duan, "Thermodynamic performance limits of the organic Rankine cycle: Working fluid parameterization based on corresponding states modeling," *Energy Conversion and Management*, vol. 217, p. 113011, 2020.

[98] R. Smith, H. Inomata, and C. Peters, "Chapter 6 - equations of state and formulations for mixtures," in *Introduction to Supercritical Fluids* (R. Smith, H. Inomata, and C. Peters, eds.), vol. 4 of *Supercritical Fluid Science and Technology*, pp. 333–480, Elsevier, 2013.

[99] A. Kumari, M. Madhaw, and V. S. Pendyala, *Prediction of Formation Conditions of Gas Hydrates Using Machine Learning and Genetic Programming*, pp. 200–224. June 2022.

[100] A. Pétrowski and S. Ben-Hamida, *Evolutionary Algorithms*, vol. 4 of *Metaheuristics Set*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1st ed., 2017.

[101] B. Belgasim, Y. Aldali, M. J. R. Abdunnabi, G. Hashem, and K. Hossin, "The potential of concentrating solar power (CSP) for electricity generation in Libya," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 1–15, 2018.

[102] E. Assareh, S. Alirahmi, and P. Ahmadi, "A sustainable model for the integration of solar and geothermal energy boosted with thermoelectric generators (TEGs) for electricity, cooling and desalination purpose," *Geothermics*, vol. 92, p. 102042, 2021.

[103] Dow Chemical Company, *DowTherm™ A Heat Transfer Fluid*. Dow Inc., Midland, MI, USA, 2023. Product Technical Data Sheet.

[104] Eastman Chemical Company, *Therminol® Heat Transfer Fluid*. Eastman Chemical Company, Kingsport, TN, USA, 2023. Product Technical Specifications.

[105] L. Wang, J. Yang, B. Qu, and C. Pang, "Multi-objective optimization of an organic rankine cycle (orc) for a hybrid solar–waste energy plant," *Energies*, vol. 17, no. 8, p. 1810, 2024.

[106] F-Chart Software, "Engineering equation solver (EES)," 2023. Thermodynamics and heat transfer analysis software.

[107] S. M. Alirahmi, E. Assareh, A. Arabkoohsar, H. Yu, S. M. Hosseini, and X. Wang, "Development and multi-criteria optimization of a solar thermal power plant integrated with PEM electrolyzer and thermoelectric generator," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 55, pp. 23919–23934, 2022.

[108] F. Yang, H. Cho, H. Zhang, J. Zhang, and Y. Wu, "Artificial neural network (ANN) based prediction and optimization of an organic Rankine cycle (ORC) for diesel engine waste heat recovery," *Energy Conversion and Management*, vol. 164, pp. 15–26, 2018.

[109] S. Verma, M. Pant, and V. Snasel, "A comprehensive review on NSGA-II for multi-objective combinatorial optimization problems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 57757–57791, 2021.

[110] C. A. Coello Coello, G. B. Lamont, and D. A. Van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Genetic and Evolutionary Computation, New York, NY: Springer, 2nd ed., 2007.

[111] R. Susmaga, I. Szczech, and D. Brzezinski, "Towards explainable TOPSIS: Visual insights into the effects of weights and aggregations on rankings," *Applied Soft Computing*, vol. 153, p. 111279, 2023.

[112] A. Kumar and D. Rakshit, "A critical review on waste heat recovery utilization with special focus on organic Rankine cycle applications," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 5, p. 100292, 2021.

[113] P. Lu, Z. Liang, X. Luo, Y. Xia, J. Wang, K. Chen, Y. Liang, J. Chen, Z. Yang, J. He, and Y. Chen, "Design and optimization of organic Rankine cycle based on heat transfer enhancement and novel heat exchanger: A review," *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1380, 2023.

[114] P. Colonna, E. Casati, C. Trapp, T. Mathijssen, J. Larjola, T. Turunen-Saaresti, and A. Uusitalo, "Organic Rankine cycle power systems: From the concept to current technology, applications, and an outlook to the future," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 137, no. 10, 2015. ASME Publication.

[115] S. I. Salah, M. Eltaweel, and C. Abeykoon, "Towards a sustainable energy future for Egypt: A systematic review of renewable energy sources, technologies, challenges, and recommendations," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 8, p. 100497, 2022.