

Diseño de una Planta Ciclo Rankine Organico para la Generacion de Energia Mediante el Aprovechamiento de las Aguas de coproduccion de un Campo Petrolero en la Cuenca del Magdalena Medio

Design of an Organic Rankine Cycle Plant for Power Generation Using the Co-production Waters of an Oil Field in the Middle Magdalena Basin

Nicolas Andres. Guevara Villate, Ángel Giovanni. Pinilla Triana, Santiago. Cespedes, Camilo Andres. Guerrero.

Fundación Universidad de América – Ingeniería de Petróleos

nicolas.guevara@estudiantes.uamerica.edu.co - angel.pinilla@estudiantes.uamerica.edu.co

Resumen— Se ha podido evidenciar que a lo largo del tiempo una de las problemáticas más notorias en la industria del petróleo como lo es el manejo de aguas de producción y las emisiones de CO₂ en cuanto a gases de efecto invernadero se refiere, ya que generan una problemática ambiental.

Buscando una solución se simulará y evaluará un sistema de Ciclo Rankine orgánico a partir de evaluar la factibilidad técnica y económica de generación de energía eléctrica con el aprovechamiento del proceso geotérmico con aguas de coproducción en un campo petrolero, con esto se buscará dar un manejo a estas aguas, que no son dirigidas a procesos de reinyección como método de recuperación secundaria en la explotación de hidrocarburos.

Debido a los altos caudales que se presentan en los campos petroleros y a las temperaturas con las que provienen dichas aguas, es viable tanto técnico/económicamente la implementación de un proceso ORC.

Este trabajo permitió obtener índices de generación eléctrica de 86.6 kWh y un potencial de aprovechamiento de 1075318.35 kW, además de un alto índice de reducción de gases de efecto invernadero con un ahorro mayor a 11 toneladas por mes de CO₂, por otra parte, los índices económicos muestran una viabilidad favorable para la implementación del proyecto.

Palabras claves— Aguas de Co-produccion, Ciclo Rankine orgánico, Generación eléctrica, Huella de Carbono y Potencial de aprovechamiento.

Abstract— It has become evident that over time one of the most notorious problems in the oil industry is the management of production water and CO₂ emissions in terms of greenhouse gases, since they generate an environmental problem.

Searching for a solution, an organic Rankine Cycle system will be simulated and evaluated to evaluate the technical and economic feasibility of electric power generation with the use of the geothermal process with co-production waters in an oil field, with this we will seek to manage these waters, which are not directed to reinjection processes as a method of secondary recovery in the exploitation of hydrocarbons.

Due to the high flow rates that occur in the oil fields and the temperatures at which these waters come from; the implementation of an ORC process is technically/economically feasible.

This work allowed obtaining electricity generation rates of 86.6 kWh and a potential of 1075318.35 Kw, in addition to a high rate of reduction of greenhouse gases with a saving of more than 11 tons per month of CO₂, on the other side, the economic rates show a favorable feasibility for the implementation of the project.

Keywords— Co-production waters, organic Rankine cycle, electricity generation, carbon footprint and potential use.

I. INTRODUCCIÓN

Con el consumo de energía en campos y necesidad de descarbonización de la industria del petróleo. En el artículo se va a llevar a cabo temas como lo son conceptos básicos sobre las aguas de producción, la actualidad con respecto a proyectos de nuevas energías que se han planteado para abastecer a los campos de petróleo, una breve explicación del funcionamiento y comportamiento de un sistema ORC. Este documento se divide en VII secciones, la primera es la descripción de los temas que se abordaran sobre los componentes en los sistemas de producción de energía. La segunda habla sobre un estado del arte donde se hablará sobre el análisis técnico/económico del sistema en un Campo petrolero. El tercero tratara sobre las propiedades fisicoquímicas del agua para tener en cuenta con el fin de tener una mayor exactitud en la simulación. El cuarto abarca el cálculo de potencial y los resultados de la simulación realizada en el programa Aspen HYSYS. El quinto se destaca ya que genera un impacto ambiental positivo dividido al cálculo de la huella de carbono. El sexto manifiesta índices económicos sobre la viabilidad y posible implementación del sistema comparándolo con mecanismos de abastecimientos convencionales de energía. El Séptimo recopila todas las conclusiones que se difieren del proyecto.

Este trabajo se enfoca en analizar el aprovechamiento de aguas de producción de campos petroleros mediante la implementación de proyectos que buscan revolucionar la obtención de energía por medio de mecanismos innovadores de autosostenibilidad y amigables con el medio ambiente.

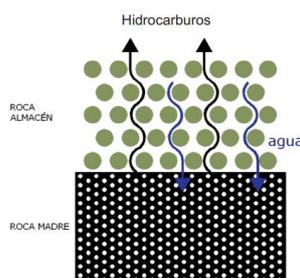
A. Agua de producción

En los yacimientos petrolíferos es bien sabido que por lo general están compuestos siempre por tres fluidos en general los cuales son aceite, aguas y gas, donde se tiene en cuenta que la mayor producción de fluido es asociada al agua con un aproximado de 210 millones de barriles por día y que acompañan 75 millones de barriles de petróleo al día [1]. Esta producción tan alta de agua trae con ella diferentes elementos tóxicos y pueden llegar a ser bastante problemáticos ya que pueden llegar a superficie emulsionadas con petróleo (W/O) y otros componentes que afectan el medio ambiente [2]. El agua es el fluido más abundante en todo el yacimiento y si bien ninguna empresa operadora quiere producir agua, este fluido es de mejor calidad en algunos casos que otros.

Es importante distinguir la diferencia del agua de barrido, agua aceptable y agua excepcional en cuanto a la producción de hidrocarburos:

1. Agua de barrido: es proveniente de pozos inyectoros o acuíferos activos cercanos a la zona de interés, donde intervienen en el barrido del crudo dentro del yacimiento.
2. Agua aceptable: es agua producida por el pozo, donde su tasa es inferior a la del límite económico en la relación agua/petróleo (RAP).
3. Agua excepcional: Es agua producida por el pozo pero que no ayuda a producir crudo o que su tasa económica es superior en relación con el agua/petróleo (RAP), donde la producción de crudo no llega a compensar los costos relacionados al manejo del agua.

Fig.1 Esquema de la migración primaria de los hidrocarburos.



Nota. Esquema de la migración primaria donde se observa como el hidrocarburo sale de la roca madre y se dirige hacia la roca almacén y fluye por medio de sus poros donde se posiciona por encima del agua debido a sus diferentes densidades. Tomado de: P. J. Coldwell et al., "Reporte de Avance de Energías Limpias Primer Semestre 2018 Secretaría de Energía: Elaboración y Revisión." [3].

B. Actualidad y proyectos asociados.

Actualmente el tratamiento de aguas ha tomado un gran peso debido a los diferentes procesos tecnológicos que se han implementado y el impacto ambiental que estos tienen. Aunque existen diferentes empresas que prestan servicios de tratamiento de aguas, el objetivo de encontrar nuevas ideas para optimizar tiempo, recursos e impacto ambiental en la industria petrolera es un reto actual. El agua en las industrias y su tratamiento es de gran importancia, debido a que gran parte de esta agua en la industria del petróleo y gas se usa en procesos de reinyección o como complemento en la elaboración de lodos. Por esta razón es necesario obtener el máximo aprovechamiento del agua con el fin de generar el menor impacto ambiental y tener mayores recursos económicos.

Desde el año 2018 se ha ido implementando un proyecto en México el cual busca la recuperación del sector energético impulsando la producción de energía con el uso de energías renovables, este proyecto tiene una duración de 6 años (2018-2024), en los cuales Petróleos Mexicanos (Pemex) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se harán cargo del proyecto en los aspectos operacional, técnico y financiero, con la finalidad de reducir la dependencia energética del exterior, procurando que se convierta en una de las influencias de desarrollo en el país[4].

En cuanto a Colombia se están realizando tres pilotos geotérmicos en el territorio Nacional donde se busca aprovechar los fluidos de coproducción de operaciones petroleras y así poder generar energía, las empresas encargadas de estos proyectos son Parex Resources en conjunto de la universidad Nacional de Colombia con sede en Medellín, donde en marzo del 2021 puso en funcionamiento el primer proyecto de generación eléctrica en el país, ubicado en el campo maracas en Casanare. la inversión aproximada del proyecto es de 1 millón de dólares donde se planea generar 100KW y reemplazar un 5% la energía generada por los hidrocarburos y generando mensualmente 72.000 kWh, lo que equivale al consumo de 480 familias respectivamente [5].

Parex de igual manera cuenta con otro plan piloto en el municipio de Aguazul, Casanare el cual generará energía equivalente a 117 hogares, se debe tener en cuenta que este proyecto se basa en una baja entalpía que se obtiene al extraer calor natural del subsuelo [6].

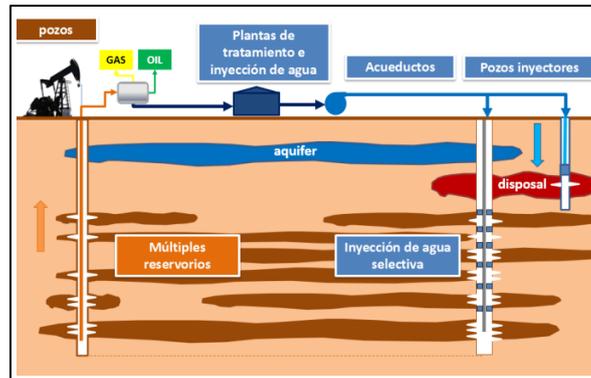
La otra empresa encargada de estos proyectos y basándose igualmente en procesos de baja entalpía es Ecopetrol con el piloto en el campo Chichimene en Acacías, Meta, con la capacidad de generar 38.400 kWh/día lo cual es equivalente al consumo de 6.659 hogares [7].

Dada la alta producción de agua que no se utiliza para fines de recobro secundario, como la inyección de agua al yacimiento por medio de pozos, parte del recurso es dispuesto a procesos de disposal alejado del yacimiento donde no se aprovechan estos cortes de agua los cuales suelen presentarse en altos volúmenes, estos pasan a ser abandonados sin un fin práctico, El propósito de un pozo disposal es ser un canal para verter el agua en el acuífero confinado y garantizar que este volumen inyectado no tenga contacto con otras zonas interés, como pueden ser los acuíferos someros o la formación productora [8]. Es allí donde el desarrollo de esta simulación busca evaluar un sistema ciclo Rankine orgánico a partir de las aguas de coproducción, tales como lo son propiedades fisicoquímicas y características de las aguas remanentes en la industria del petróleo para la producción de energía. Parámetros como cortes de producción mayores al 90% y temperaturas superiores a 176°F son consideradas, al igual que diferentes tipos de tratamientos para llevar las aguas a condiciones que no afecten la

tecnología de producción de energía en campo. Esta energía generada representaría una ganancia en campo para ser dispuesta en diferentes equipos y actividades que se encuentran en operación.

A continuación, se muestra el esquema típico de producción y distribución de agua de un campo petrolífero en la figura 2, donde se cuenta con el yacimiento donde están presentes los fluidos, acuíferos de agua cercanos, una caverna destinada al método disposal, el pozo inyector y el pozo productor, y la plata de tratamiento y de inyección del agua.

Fig. 2 esquema más común de producción y manejo del agua en un campo petrolífero [10].



Nota. El sistema de producción consiste en que los fluidos del yacimiento fluyen al pozo hasta llegar a superficie, donde llegan al sistema de separadores y se deja independiente lo que es el aceite, agua y gas, de ahí va a la plata de tratamiento y de inyección, donde el agua es de vuelta al yacimiento para así realizar producción secundaria o dispuesta a cavernas de disposal. Tomado de: "El manejo del agua producida en la industria petrolera Argentina Por: Ing. Marcelo Hirschfeldt-Oil Production Consulting." [9].

De acuerdo con el esquema, el sistema ORC se implementará posteriormente a la planta de tratamiento e inyección de agua, esto se debe ya que se le realiza una extracción de los cortes remanentes de petróleo y sedimentos presentes en el agua, se lleva a cabo por medio de una filtración del fluido el cual no presenta una pérdida de temperatura significativa [11].

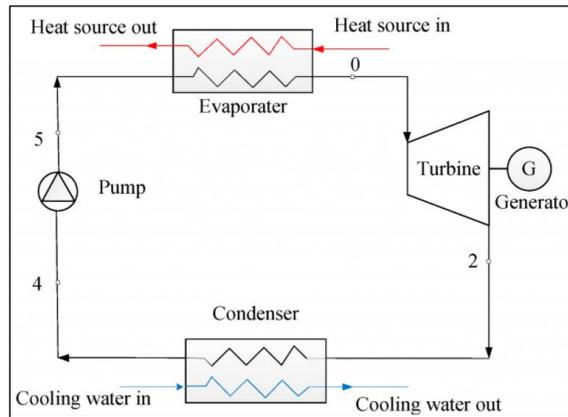
C. Sistema ciclo Rankine Orgánico.

Este proceso consiste en un proceso termodinámico compuesto por dos transferencias isentrópicas y dos isobaras, donde lo que se busca es transformar el calor en trabajo. este proceso consiste en calentar aguas hasta llegar a su punto de ebullición por medio de una caldera y así poder elevar la presión de vapor, posteriormente éste será transportado a una turbina la cual genera energía cinética a medida que va perdiendo presión. de ahí sigue a un condensador para que el restante de vapor llegue nuevamente a su estado líquido y así llegar a una bomba que su finalidad es subir la presión para posteriormente volverlo a introducir a la caldera.

Este ciclo es generalmente utilizado en centrales termodinámicas para la generación de energía eléctrica, donde su fluido motor es el agua, donde se puede presentar en forma líquida o vapor para poder cumplir con este objetivo el agua tiene que ser tratada en un proceso de desmineralización y desgasificada adecuadamente.

El ciclo se puede ver sujeto a dos modos en específico, donde puede ser cerrado el cual se evidencia en las centrales termoeléctricas, donde es posible la explotación del calor residual ocurrida en la condensación de vapor o también verse sujeto a la transportación de una red de calefacción urbana. El ciclo abierto consiste en descargar el vapor a la atmósfera, ejemplos de esto son las viejas locomotoras [10].

Fig.3 Diseño del ciclo Rankine.

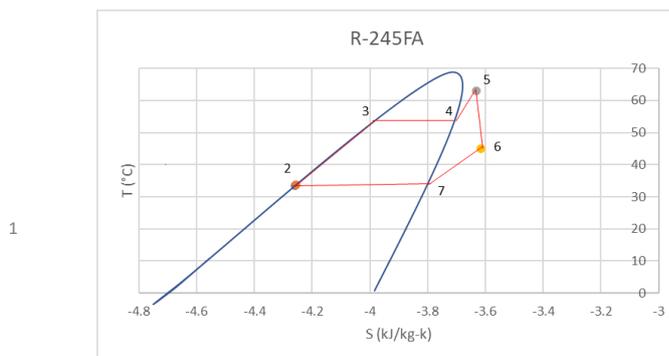


Nota. El sistema ciclo Rankine Orgánico se compone básicamente de una bomba, un condensador, una turbina y un evaporador los cuales realizan intercambio de calor por medio de dos fluidos uno externo y uno interno, para luego generar una energía resultante. Tomado de: “¿Qué es el ciclo de Rankine? Conversión de calor en trabajo.” <https://solar-energia.net/termodinamica/ciclos-termodinamicos/ciclo-rankine> (accessed Nov. 11, 2021). [12]

El mecanismo ciclo Rankine se divide en cuatro procesos los cuales son:

1. 4-5: donde se evidencia que la presión del líquido aumenta sin pérdidas de calor gracias a una bomba o compresor, donde se aporta un trabajo.
2. 5-1: aquí hay una transmisión de calor proporcionada al fluido trabajado que se encuentra en presión constante en la caldera. Con este calor el líquido es vaporizado y logra llegar a su punto de temperatura más alto.
3. 1-2: en este proceso se lleva a cabo una expansión de forma adiabática, donde el vapor realiza un trabajo ejerció hacia la turbina desde la presión de caldera hasta un bajo valor de presión el cual es transportado o transferido en vapor al condensador.
4. 2-4: en este último proceso del ciclo se refrigera el vapor de trabajo de presión constante en el condensador para así llegar de nuevo a su estado líquido y poder empezar de nuevo un nuevo ciclo [13].

Fig. 4 Diagrama T-s de un ciclo Rankine empleando refrigerante R-245FA



Nota. En el proceso de 1 a 2 es donde el fluido de trabajo (refrigerante) entra a la bomba y esta sube la presión para así desplazarlo hasta al evaporador donde se encuentra el fluido geotérmico pero no se mezclan ni se tocan, solo se realiza el respectivo intercambio de calor, esto genera que el fluido de trabajo cambie de estado del punto 3 al 4. Del punto 4 al 5 se presenta un proceso de sobrecalentamiento, en el punto 5 el fluido de trabajo entra a la turbina, de 5 a 6 el fluido se encuentra presente como gas seco en la turbina, posteriormente el fluido cae y se presenta un modelo de tipo isentrópico, en el punto 6 entrar al condensador, en la transición del punto 6 al punto 7 el fluido se enfría y de 7 a 1 se condensa por medio del agua de servicio donde nuevamente no entran en contacto directamente los fluidos sin embargo se presenta un intercambio de calor dando así que se vuelva a dar inicio al ciclo.

D. Refrigerante R-245FA.

Este tipo de refrigerante también llamado Pentafluoropropano, es de tipo incoloro y fluye fácilmente, tiene un punto de ebullición de 15.3°C haciendo que no requiera una alta cantidad de temperatura que posteriormente ayudara al cambio de fase liquido-vapor, es estable en condiciones normales de temperatura y presión.

Es común como agente espumante para refrigeradores y placas de materiales aislantes de poliuretano, también utilizado en sistemas relacionados con la recuperación de calor en sistemas de ORC y en sistemas de recuperación de energía donde se presentan altas temperaturas y de alta potencia [14].

Este refrigerante fue seleccionado ya que puede mejorar de manera efectiva la eficiencia del sistema ORC entre un 5-8%, además del bajo impacto ambiental y económico, este refrigerante se considera uno de los más seguros para su manejo en la industria ya que no es inflamable ni tóxico como si lo son el isobutano, isopentano y el n-pentano.

E. Huella de carbono.

Este parámetro sirve para medir y cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero, que son producidas y posteriormente liberadas a la atmósfera de una forma directa o indirecta por medio de un evento, productos, organización o individuos.

Los Gases de efecto invernadero se pueden encontrar como metano, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y ozono. Donde la huella de carbono comparativo es el primer paso para que las organizaciones puedan controlar, reducir o compensar sus emisiones de gases en las diferentes actividades que lleguen a realizar [15].

El dióxido de carbono es el gas más nocivo y que tiene más impacto en cuanto al efecto invernadero, ya que puede permanecer por cientos de años en la atmósfera y por más tiempo en el océano [16].

II. METODOLOGÍA

A. Aspen

Aspen es un simulador muy utilizado en la industria química para realizar su modelamiento y simulación de procesos tanto en estado estacionario como transitorio. Es la herramienta de simulación más utilizada alrededor del mundo ya que no es difícil de utilizar, es muy simple y eficaz. puede trabajar con operaciones unitarias, diferentes combinaciones de equipos como también de compuestos. Las grandes ventajas de este software es que puede trabajar y aplicarse en diferentes sectores de la industria en general tal como lo es plantas industriales complejas, circuitos de vapor, aplicabilidad en procesos petroleros y del gas, mecánica de fluidos y termodinámica [17].

Esta herramienta es capaz de realizar varios cálculos utilizados en la ingeniería básica como lo son balance de energía, balance de masa, estimación en transferencia de calor o transferencia de masa, fraccionamiento, equilibrio-líquido vapor, entre otros. básicamente el programa está regido a un modelamiento en específico creado por el usuario donde diseña un proceso químico y posteriormente lo ejecuta para así observar y analizar cálculos basados en estimaciones bien confiables, esto conlleva a que se pueden plantear varios escenarios y comparar cual tiene una mayor viabilidad y cumplan con los requerimientos exigidos por su creador [18].

Este simulador se trabajará para analizar distintos escenarios de producción de energía a través de ORC;

TABLA 1.
Datos generales de producción por día del Campo.

Ítem	Bls/Día	Kg/h
OIL	438	2582,798
H ₂ O	44228	293.969
Temperatura Promedio °C	86.8	

Nota. Esta tabla indica la producción volumétrica y másica del petróleo y aguas provenientes del yacimiento a una temperatura promedio de 86.8°C.

TABLA 2.
Datos de producción de agua empleados en la simulación.

Producción	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Pozo 4	Pozo 5	TOTAL
H_2O (Bls)	9173	16113	8046	9561	1335	44228
H_2O (Kg/h)	60969.87	107097.74	53479.08	63548.78	8873.30	293968.77

Nota. En la tabla se hallan los valores de agua producidos en cada pozo del campo los cuales se emplean para la simulación.

En el simulador se analizará la potencia producida en cada caso y se evaluará el rendimiento técnico/económico de los escenarios evaluados.

B. Análisis técnico.

A de saberse que ninguna máquina de motor térmico tiene una eficiencia del cien por ciento (100%), es por esta razón que para calcular esta eficiencia se debe tener la relación del trabajo (W) y el calor de entrada (Q). Es por lo que se debe tener en cuenta la ecuación de eficiencia térmica [19].

Se evaluará la eficiencia de producción de energía a través de la siguiente ecuación:

$$n_{th} = \frac{W}{Q_h}$$

Donde:

n_{th} = Eficiencia Térmica.

Q_h = Fracción de Calor.

w = Trabajo Realizado.

Se aplica la siguiente ecuación para evaluar la eficiencia de la turbina ya que en este proceso es de suma importancia que se cumpla el cambio de fase líquido-vapor:

$$\eta_T = \frac{W_{real}}{W_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Donde:

h_1 = Entalpia específica del gas en la entrada

$h_{2=}$ Entalpia específica del gas a la salida del proceso real

$h_{2=}$ Entalpia específica del gas a la salida del proceso isoentrópico.

Para realizar el ORC en esta simulación se tienen en cuenta las siguientes especificaciones en cada uno de los equipos para así cumplir con un rendimiento óptimo y generar la mayor energía posible:

- Evaporador: Modelo Shortcut, a una presión de 1.01325 bar @ 86.8 °C.
- Turbina: La turbina sigue un modelo de tipo isoentrópico la cual tiene una presión de descarga de 2 bar y trabaja con una eficiencia de 72%.
- Condensador: Es de modelo de cálculo Hot stream outlet degrees subcooling.
- Bomba: tiene una presión de descarga de 5 bar y trabaja una eficiencia del 51%.

Ecuaciones correspondientes al balance de energía y entropía en cada uno de los equipos teniendo en cuenta sus condiciones de entrada y salida de cada uno de los fluidos:

$$\dot{w} = \dot{m} * h$$

Donde:

\dot{w} = Potencia.

\dot{m} = Flujo masico.

h = Entalpia.

$$S = \dot{m} * s$$

Donde:

S = Entropía.

\dot{m} = Flujo masico.

s = Entropía específica.

$$S_{gen} = S_{out} - S_{in}$$

Donde:

S_{gen} = Entropía generada.

S_{out} = Entropía de salida.

S_{in} = Entropía de entrada.

$$Produccion\ Global_{(kW)} = Prod.\ turbina - cons.\ bomba$$

Para realizar un correcto diseño y análisis del sistema ORC, en cada equipo involucrado y de igual manera la obtención global de kW generados es necesario conocer propiedades extensivas tales como: entalpia, entropía además flujos masicos y la producción neta de energía.

C. Análisis económico.

A través del Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) se evaluará la viabilidad económica del proyecto en caso de que se desee implementar en el Campo en un futuro

- El valor presente neto (VPN): Es el modelo más implementado al momento de evaluar proyectos de inversión a mediano y largo plazo donde se puede establecer si la inversión tiene un valor evaluado puede ser positivo, mantenerse igual o en casos puede ser negativo esto depende de la inversión inicial (CAPEX) e inversiones durante el proceso para que el proyecto se mantenga estable en la operación (OPEX), de igual manera es importante el tiempo de la duración del proyecto y la tasa de descuento[20].

$$VPN = -I_0 + \sum \frac{B_n - C_n}{(1 + d)^n}$$

Donde:

VPN = Valor Presente Neto.

I = Inversión.

B = Beneficios Directos.

C = Costos Directos.

d = Tasa de descuento o costo de oportunidad del dinero.

n = Número de años del Horizonte de evaluación.

- Tasa interna de retorno (TIR): Indica la rentabilidad de inversión del proyecto en un tiempo determinado donde se descuentan los flujos de cobros y pagos previstos para que de esta manera se pueda generar la participación de nuevos inversionistas, por lo general esta tasa de rendimiento interno en la herramienta más usada para finiquitar una decisión en un proyecto [21].

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{Fn}{(1+i)^n} = 0$$

Donde:

F = Flujo neto.

n = Horizonte evaluación.

I = Inversión en el momento inicial.

- Este indicador proporciona una comparación directa entre los beneficios y costos en un proyecto con el fin de definir su viabilidad [22].

$$B/C = \frac{VP(B)}{I + VP(O \text{ y } M)}$$

Donde:

VP (B) = Valor presente de beneficio.

I = Inversión inicial proyecto.

O y M = Costos de operación y mantenimiento del proyecto.

III. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL AGUA

Las propiedades fisicoquímicas son muy importantes ya que proporcionan una información sobre el comportamiento que tendrá una sustancia o material en general ante cualquier reacción externa, debido a las propiedades microscópicas del material, donde la configuración electrónica determina los tipos de enlaces atómicos y estos a su vez forjan las propiedades del material [23].

La estructura y composición del agua está dada por la unión de sus átomos de hidrogeno con los átomos de oxígeno y esto es ocasionado gracias a enlaces covalentes [24].

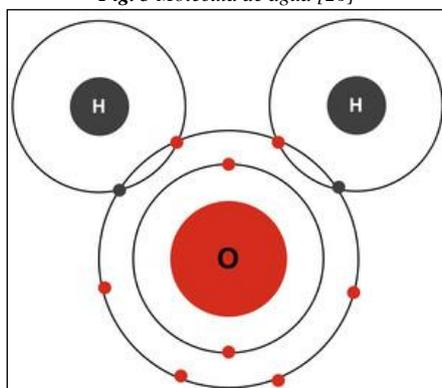
TABLA 3.
Propiedades de los compuestos.

Cto	Cte. dieléctrica a 20 °C	Punto de fusión (°C)	Punto de ebullición (°C)	Calor vaporización (Cal/g)	Capacidad calorífica (Cal/g°C)	Calor de fusión (Cal/g)
H ₂ O	78,5	0	100	540	1,000	80
Etanol	24	-114	78	204	0,581	24,9
Metanol	33	-98	65	263	0,600	22
Acetona	20,7	-95	56	125	0,528	23
NH ₃	16,9	-78	-33	327	1,120	84
H ₂ S	9,3	-83	-60	132	-	16,7
HF	-	-92	19	360	-	54,7

Nota. En la tabla se presentan compuestos que logran tener propiedades de tipo solvente similares al agua o que pertenecen al mismo grupo del oxígeno por contener azufre que pueden llegar a formar hidruros. [25]

El agua posee los valores más altos en la tabla debido a que la molécula del agua es muy polarizada o tiene una distribución desigual de electrones en ella. El lado de la molécula donde se encuentra el oxígeno es relativamente rico en oxígeno, mientras los núcleos de hidrogeno están relativamente desnudos y proporcionan una carga parcial positiva.

Fig. 5 Molécula de agua [26]



Nota. La molécula de agua se compone de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. A un lado los de hidrógeno, con carga eléctrica positiva. Al otro el de oxígeno con carga negativa.

A. PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA

- **Densidad:** Los estudios de densidad del agua se han realizado ya hace bastante tiempo con una exactitud y precisión muy altos, cuando el agua está sometida a una temperatura promedio de 20°C su densidad será correspondiente a 0.998 g/cm³ ya al estar a temperaturas inferiores y llega a 0°C se transformará en hielo y con temperatura constante la temperatura ira disminuyendo alrededor de un 10%, debido al cambio de fase y expansión [27].
- **Tensión superficial:** Esta propiedad se produce gracias a la atracción de moléculas en la superficie, debido a que el líquido puede comportarse como una película que tiende a alargarse, pero a su vez ofrece un grado de resistencia al intentar romperse. El agua debido a su alta tensión superficial se ve afectada por el fenómeno de capilaridad [27].
- **Calor específico:** esta propiedad en el agua se le conoce como la energía necesaria para poder elevar la temperatura, esto se relaciona a los puentes de hidrogeno. El agua cuenta con una gran absorción de calor que sirven para posteriormente romper puentes o cadenas de hidrogeno, esto conlleva a una elevación de temperatura de manera lenta, su capacidad calorífica es mayor a otros líquidos y por ende se necesita más energía para llegar a su punto de evaporización [27].
- **Conductividad térmica:** cuando la temperatura del agua está en el rango de 0° a 100° C su conductividad térmica aumenta ligeramente, si la temperatura del agua está en 0° C y se encuentra en estado sólido su conductividad térmica es cuatro veces mayor que si se encontrara en estado líquido, esto quiere decir que el hielo conduce más rápidamente la energía calorífica. Esta propiedad no llega a ser lineal y llegando a un máximo a los 130° C aproximadamente [27].

- Turbidez: Está relacionada con la expresión de la propiedad óptica y es que la luz que se está propagando no se transmitirá en línea recta si no que se dispersa y absorbe. Este efecto es producido por materiales que pueden estar en suspensión en un líquido como materia orgánica e inorgánica, arcillas, organismos planctónicos, limo y demás microorganismos. Estos afectan directamente al flujo de energía y su productividad dentro de ecosistemas, La turbiedad define el grado de opacidad producido en el agua por la materia particulada en suspensión [27].

B. PROPIEDADES QUIMICAS DEL AGUA

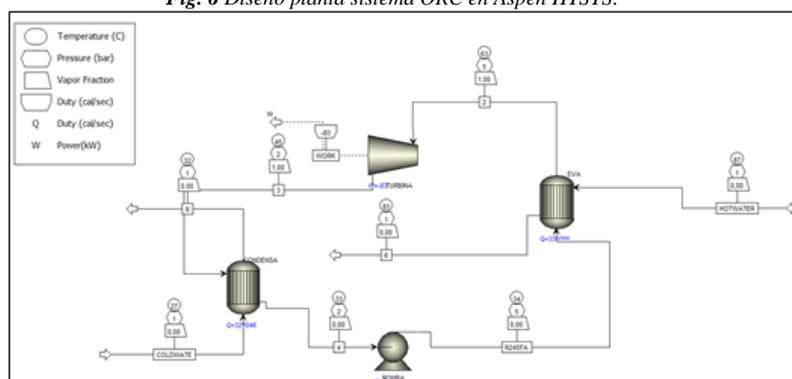
- Cloruros: Esta sustancia depositada en el agua natural es gracias a la disolución de deposición mineral de sal gema, por la presencia cercana de minas de sal potásicas, contaminación atribuida a efluentes de actividad industrial y aguas excedentes de riegos agrícolas [27].
- Dureza: Es la cantidad que hay de iones de calcio y magnesio presentes en el agua, se evalúan como carbonato de calcio o magnesio, si el agua presenta baja dureza es biológicamente poco productiva y blanda, mientras que si posee una dureza elevada es considerada muy productiva y por último aguas con dureza intermedia son consideradas óptimas para fauna y flora variadas, pero en términos de biomasa son poco productivas [27].
- Sólidos Suspendidos: Son comúnmente arena, virus y limo, y son los responsables de impurezas visibles. Consiste en partículas muy pequeñas que no son posibles drenarlas por deposición [27].
- Sólidos totales: Es el resultado de la evaporización del agua a 103-105°C y su posterior obtención de materia o residuos, estos pueden incluir suspendidos y disueltos, donde los disueltos son los recolectados después del secado de la muestra y previa filtración de las partículas mayores a 1.2 μm [27].
- Alcalinidad: Es como el agua es capaz de neutralizar ácidos y en una muestra son todas las que se pueden llegar a titular, en general mucha de las aguas contribuye su alcalinidad al contenido de carbonatos, hidroxilos y bicarbonatos los cuales pueden ser (potasio, sodio, calcio y magnesio), por tanto, se toma como un indicador de la concentración de estos constituyentes. Este parámetro indica cambios en el PH [27].

La alcalinidad juega un papel muy importante en los procesos de coagulación química, ablandamiento y control de la corrosión [27].

Estas propiedades se mencionan debido a su importancia en la transferencia de calor entre el agua y el sistema ORC, es decir, estas aguas pueden presentar precipitados de inorgánicos que pueden ocasionar resistencias para la transferencia de calor. por esta razón, esta investigación también muestra sobre qué tipo de propiedades se necesitan estudiar para la aplicación de aprovechamiento de recurso geotérmico en campos petroleros.

IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y CÁLCULO DE POTENCIAL

Fig. 6 Diseño planta sistema ORC en Aspen HYSYS.



Nota. Esquema de ciclo Rankine realizado en Aspen Hysys.

TABLA 4.
Ciclo Abierto.

CORRIENTE	T ^o	PRESION (BAR)	FLUJO MASICO (kg/s)	ENTALPIA (kJ/kg)	ENTROPIA (kJ/kg-K)
6	82.99	1.01	81.66	-15,698.58	-8.5124
9	31.84	1.00	61.24	-15,930.49	-9.2152
COLDWATE	27.00	1.00	61.24	-15,952.35	-9.2875
HOTWATER	86.80	1.01	81.66	-15,681.21	-8.4639

Nota. datos obtenidos de la simulación para el ciclo abierto.

En la tabla IV se presentan los datos del ciclo abierto del sistema ORC, en el cual se hace referencia al fluido geotérmico y fluido de servicio los cuales interactúan con el evaporador y el condensador respectivamente.

TABLA 5.
Ciclo Cerrado.

CORRIENTE	T ^o	PRESION (BAR)	FLUJO MASICO (kg/s)	ENTALPIA (kJ/kg)	ENTROPIA (kJ/kg-K)
2	63.08	5.00	6.81	-8,725.44	-3.6318
3	45.00	2.00	6.81	-8,737.57	-3.6169
4	33.44	2.00	6.81	-8,934.31	-4.2579
R245FA	33.74	5.00	6.81	-8,933.87	-4.2572

Nota. La tabla presenta los datos obtenidos de la simulación respectivos a las corrientes del ciclo cerrado.

En la tabla V se presentan los datos del ciclo cerrado del sistema ORC, en el cual se hace referencia al refrigerante R-245FA

A. Descripción del sistema.

El sistema de ORC que se empleara en la simulación consta de una bomba que envía el refrigerante de referencia R-245FA por el sistema con un flujo masico de 24502.9 Kg/hr, donde al entrar al evaporador realiza un intercambio de calor con el agua de producción proveniente del yacimiento, el agua de trabajo previamente fue tratada mediante el uso de separadores y la planta de tratamiento la cual reduce considerablemente las características y componentes no deseables del agua, en este proceso hay una disminución de temperatura poco considerable, por lo tanto se asume constante la temperatura (86.8°C) de entrada al evaporador con un caudal promedio de 44.228 Bls/ día, el agua entra como liquido subenfriado y sale como vapor sobre calentado mediante un proceso realizado a presión constante de 1.0132 bar esto hace que el refrigerante entre así a la turbina donde se expande como un modelo isoentrópico produciendo trabajo al hacer girar un eje que está conectado a un generador eléctrico, la presión y la temperatura disminuyen en este proceso, posteriormente el fluido es enviado al condensador donde el vapor entra como gas húmedo y sale como un líquido saturado gracias a que el condensador rechaza el calor hacia un medio de enfriamiento gracias al agua de servicio, luego este fluido entra de nuevo a la bomba donde se completa el ciclo. Cabe mencionar que si se quiere un proceso más eficiente es necesario implementar sistemas de precalentamiento, recalentamiento y regeneración.

B. Cálculo de potencial de recurso geotérmico

TABLA 6.

Masa de entropía, componente puro.

Item	Valor
Exergía (KJ/Kg)	13,169
Flujo Masico (kg/s)	81.65
Power, kW	1,075,318.35

Nota. Se muestra la cantidad total de energía generada a partir de la cantidad de flujo masico, si el sistema tuviese una eficiencia de rendimiento del 100%, datos obtenidos de la simulación.

TABLA 7.

Propiedades del agua saturada liquido-vapor

Flujo	Valor
Entalpia (KJ/Kg)	15691.70
Entropía (KJ/Kg)	8.469
Flujo de entalpia (J/s)	1,28E+12

Nota. Debido a la cuantía de entropía dentro del sistema es bajo implica un menor nivel de caos y como consecuencia un mayor intercambio de energía, datos obtenidos de la simulación.

Se realizo el cálculo de potencial de generación de energía en base del recurso geotérmico dispuesto en el campo ya que es la fuente de energía, donde se logra identificar un alto potencial con un valor de 1.075.318 kW, por otra parte, como se puede observar la energía que se involucra como flujo de entalpia es de 1.281E+9 J/Sec. Se puede analizar que hay diferencias entre el potencial y la energía, esto se debe a la irreversibilidad del sistema y a la ineficiencia inherente de todos los procesos. Se tomo la entalpia y entropía antes de entrar al evaporador (tabla VII).

C. Potencial neto de energía generado calculado a través de los balances de entalpia y entropía de los equipos

TABLA 8.

Balace de energía

Equipo	Entra (kW)	Sale (kW)	Diferencia (kW)
Evaporador	-1,341,303.224	-1.341.303,224	0
Turbina	-59,388.39	-59.471,015	83
Condensador	-1,036,448.805	-1.036.448,805	0
Bomba	-60,810.091	-60.807,047	-3

NOTA. Para el balance de entalpia en cada uno de los equipos se tienen en cuenta los flujos masicos y entalpias, de entrada y salida respectivamente y así obtener la diferencia de energía. Datos tomados de la simulación.

Se observa que el balance de energía los valores del evaporador y el condensador son cero, esto debido a que en esos equipos solo hay intercambio de calor entre los fluidos, es preciso señalar que estos no entran en contacto ya que están separados. la energía generada por la turbina es equivalente a 83 kW y lo consumido por la bomba al momento de realizar el trabajo es de 3 kW.

TABLA 9.
Balance de entropía.

Equipo	Entra (kW/K)	Sale (kW/K)	Entropía Generada (kW/K)
Evaporador	-720.1181599	-719.8238838	0.294276
Turbina	-24.71950631	-24.61769313	0.101813
Condensador	-593.4168782	-593.3543755	0.062503
Bomba	-28.98097643	-28.97600527	0.004971

Nota. Balance de entropía para cada uno de los equipos, teniendo en cuenta los flujos de entropía de entrada y salida respectivamente de los equipos y así obtener la entropía total. Datos tomados de la simulación.

El balance de entropía permite evidenciar las irreversibilidades que se producen en el sistema. Donde el evaporador se posiciona como el equipo con mayor entropía, seguido por la turbina. Se pueden optimizar los diseños e implementar adecuaciones basándose en las condiciones específicas que se presenten en el campo a analizar.

TABLA 10.
Producción neta de energía a través de orc.

Global (kW)	
Produce turbina	82.7
Consume bomba	3
Produce neto ORC	79.7

Nota. Producción Neta en kW, presente en el sistema en relación de lo que produce la turbina y lo que consume la bomba.

En cuanto a la producción neta de energía se tiene en cuenta lo que puede generar la turbina y lo que consume la bomba para así obtener una producción neta en el ORC equivalente a 79.7 kW de energía.

D. Resultados.

TABLA II.
Obtención de ganancia energética por pozo.

Ítem	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Pozo 4	Pozo 5	TOTAL
H ₂ O fría (fluido de servicio) (Kg/h)	45727.40	80323.31	40109.31	47661.59	6654.98	220476.58
Refrigerante (Kg/h)	5334.86	9371.05	4679.42	5560.52	776.41	25722.27
Potencia (kW)	18.00	31.44	15.79	18.76	2.62	86.60

NOTA. Se muestran tanto el flujo masico del agua referente a cada pozo y puesto a disposición del sistema como la cantidad de refrigerante empleado para el proceso, mostrando así la ganancia energética para cada pozo.

Se tomaron los valores suministrados por la producción del campo donde se hicieron los cálculos pertinentes con el fin de determinar la cantidad de flujo que se suministrará al ORC, dando así se trabajará a un 75% y un 8.5%, de agua de servicio y refrigerante respectivamente con respecto al 100% del agua obtenida por geotermia que se menciona anteriormente (estos porcentajes fueron suministrados por una empresa operadora de la industria de los hidrocarburos la cual realizo un proyecto similar en Colombia). Teniendo claro estos volúmenes de fluidos que circularan por medio del sistema, el simulador se ejecutó y presento la energía suministrada por cada uno de los pozos existentes en el campo dando así una producción total de 86.6 kW. Se manejo esta proporción de los

caudales ya que se observó que bajo estos parámetros se obtuvieron altas cantidades de energía, un rendimiento mayor y bajos costos.

$$E_{kWh} = P_{kW} * t_h$$

Donde:

E_{kWh} = Energía en kilowatts por hora

P_{kW} = Potencia en kilowatts

t_h = tiempo en horas

Con el potencial obtenido se procede a calcular la energía eléctrica adjudicando como resultado 62,352 kWh por mes donde se comparó con el consumo de una familia con un promedio de 251 kWh de energía de los últimos 6 meses el cual se difiere que con este proyecto si se deseara suministrar la energía sustentaría la energía alrededor de 248 hogares por mes.

V. CUANTIFICACIÓN Y REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO₂

Para esta simulación de halló la huella de carbono con el fin de conocer el valor de la reducción de gases de efecto invernadero, con la implementación de un sistema ORC en campos petroleros y determinar la contribución que consigue con respecto al medio ambiente.

TABLA 12.
Calculo huella de carbono

Ítem	Valor
Potencia kW	86.6
Densidad gas natural Kg/m ³	0.737
Coefficiente promedio de dióxido de carbono de gas natural Kg CO ₂ / ft ³	0.0548
Coefficiente promedio de dióxido de carbono de gas natural Kg CO ₂ /m ³	1.935
Toneladas CO ₂ al mes	11.15

Nota. Se comparan los sistemas convencionales frente al sistema ORC teniendo en cuenta la misma cantidad de energía producida 86,6kW.

Se ahorran alrededor de 11 toneladas de CO₂ por el uso de energía geotérmica en el campo petrolero y de esta manera dejando de quemar combustible fósil en el mismo, lo cual sería muy beneficioso principalmente para el medio ambiente y también en la parte económica.

VI. VIABILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO

Con el propósito de evaluar este proyecto se analizaron diferentes indicadores tales como el Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y relación beneficio costo, cabe mencionar que se tuvo en cuenta un periodo de seis años para el retorno del capital inicial y una tasa fija del 6.5% los cuales proporcionaron y determinaron la viabilidad de implementación del sistema comparándolo con sistemas convencionales de abastecimiento de energía.

Como estudio base se tomó una inversión inicial de un millón de dólares, el cual contempla la compra inicial de los equipos e instrumentación necesaria, mantenimiento, transporte, obras civiles y eléctricas, personal capacitado,

entre otros gastos inesperados.

En vista de que en la simulación se genera por día un promedio de 86.6 kW a continuación se muestra en la tabla el costo por kWh referente a diversos fluidos utilizados en los sistemas convencionales.

TABLA 13.
Costos de producción mensual energía

Mas costoso al más económico			
Fluido	Costo ud kWh	unidades	Costo al mes kWh
GLP	0.24	USD/kWh	623,542
Coesgen	0.23	USD/kWh	597,561
Diesel	0.22	USD/kWh	571,580
Crudo	0.20	USD/kWh	519,618
Agua	0.15	USD/kWh	389,714
Gas	0.13	USD/kWh	337,752

Nota. Se manifiesta el costo por unidad de cada uno de los fluidos. (Costos por unidad de kWh de generación eléctrica en un campo correspondiente a una empresa de hidrocarburos privada en Colombia).

Teniendo como referencia la generación eléctrica dada por el simulador y los costos por unidad de kWh de la empresa privada, se multiplica por el total de días del mes y se obtiene los valores de la tabla anterior, donde se observa que el sistema que presenta un costo mayor por unidad de kWh generado es el Gas licuado de Petróleo (GLP), respecto al gas proveniente del campo, esto se debe al tratamiento que se debe realizar a este tipo de compuesto ya que está sometido a procesos físicos y químicos, mientras que el gas es más de factible de aprovechar puesto que proviene del yacimiento que se está explotando, por ende no necesita un tratamiento muy especializado para su aprovechamiento energético. Esto se evidencia ya que el (GLP) cuesta poco más o menos el doble que una unidad de gas.

Debido al costo de unidad de kWh referente al agua su valor de generación energética por valor unitario es económico frente a los demás fluidos, aportando una buena rentabilidad financiera para la selección de este sistema.

A través de la implementación de los indicadores en el proyecto fueron evaluados cada uno de los sistemas de generación eléctrica en un lapso de seis años, para determinar los egresos e ingresos y en cuanto tiempo presentaran una ganancia económica respectivamente.

Relacionado a los egresos se emplearon parámetros como el costo de operación, el cual para cada sistema se tomó un rango entre 7.236.366 USD y 4.422.224 USD dependiendo el tipo de fluido empleado, costo de mantenimiento anual se tomó que para cada uno de los sistemas es de 2.371.497 USD exceptuando al agua ya que tiene un valor menor de 1.856.843 USD y para el último parámetro, el capital inicial se amortizo en los seis años de la inversión inicial. Teniendo unos ingresos constantes para cada uno de los sistemas de generación y proyectándolo con una tasa de inflación constante se obtuvieron ganancias para cada método, donde se determinó que el fluido más rentable es el agua a través de un ORC.

TABLA 14.
Valor Presente Neto

VPN	
GLP	2,443,716.153 USD
Coesgen	4,868,519.521 USD
Diesel	721,562.89 USD
Crudo	7,670,890.563 USD
AGUA	19,170,187.58 USD
GAS	18,564,985.73 USD

Nota. Comparación entre cada sistema mediante el uso del VPN.

Al traer a valor presente las ganancias en el transcurso de los seis años y comparado con la inversión inicial se puede evidenciar que el proyecto con mejor desempeño en el VPN fue el correspondiente al sistema ORC.

TABLA 15.
Tasa Interna de Retorno.

TIR	
GLP	36%
Coesgen	68%
Diesel	99%
Crudo	105%
AGUA	342%
GAS	243%

Nota. Comparación cada sistema mediante el uso de la TIR.

En cuanto a la tasa interna de retorno se evidencia que los fluidos GLP y Coesgen son los de menor porcentaje de recuperación de capital frente al gas y el agua cuyo porcentaje de retorno es un poco más de 2 años

TABLA 16.
Relación costo-beneficio

RELACIÓN COSTO BENEFICIO	
GLP	2.5
Coesgen	4.3
Diesel	6.1
Crudo	6.5
AGUA	20.2
GAS	14.5

Nota. Comparación relación costo beneficio de cada sistema.

En cuanto a la relación costo beneficio se obtuvo que todos los sistemas de generación con sus respectivos fluidos base obtuvieron como mínimo duplicar el dinero de la inversión inicial durante los seis años. Fluidos como el gas y el agua presentaron una rentabilidad favorable, puesto que se recuperó en un periodo menor al de la vida útil del proyecto el coste inicial

VII. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta los parámetros fisicoquímicos en la simulación se logra obtener una apreciación sobre la posible formación de escamas inorgánicas en el proceso afectando el sistema ORC, además estos datos nos generan un resultado más acertado a lo que se presentaría en el Campo.
- El aprovechamiento energético que se presenta en el Campo, aunque es de baja entalpía presenta una ganancia energética favorable para la producción de calor, que posteriormente se convierte en energía eléctrica.
- Al realizar una exhaustiva búsqueda de información por medio de bibliografía se logró diseñar un modelo de planta a simular con un sistema ORC y que no se ve afectada con el agua empleada en dicho proceso.
- Al simular el comportamiento de producción de energía del sistema ORC a través de un caso base y modelándolo con los datos proporcionados del Campo se evidencia una buena producción de energía, mostrando así una buena viabilidad de implementación del proyecto (gracias a los elevados caudales de agua y a la temperatura que se producen).

- La alta producción de energía que se obtiene mediante el sistema ORC es suficiente para abastecer parte de la demanda energética en el propio campo mes a mes dando así un ahorro económico significativo.
- Al escatimar la cantidad de CO_2 por mes, es bastante beneficioso principalmente para el medio ambiente y como consecuencia un mejor entorno, ya que se reduce la quema de combustible fósil.
- Debido al costo de unidad de kWh referente al agua, su valor de generación energética por valor unitario es económico al compararlo con los demás fluidos, aportando una buena rentabilidad financiera para la selección de este equipo.

VIII. REFERENCIAS

- [1] “(PDF) Control del agua | Diego Barragán Academia.edu.” https://www.academia.edu/28686701/Control_del_agua (accessed Nov. 11, 2021).
- [2] A Gomez Loarte and L Huaman Mesia, “Los Hidrocarburos,” *Hidrocarburos*, pp. 1–12, 2010, [Online]. Available: quimicaorganica.iii.bligoo.com.mx/hidrocarburos-saturados-e-insaturados.
- [3] P. J. Coldwell *et al.*, “Reporte de Avance de Energías Limpias Primer Semestre 2018 Secretaría de Energía: Elaboración y Revisión.”
- [5] “3 proyectos piloto de energía geotérmica desarrollados en Colombia | Piensa en Geotermia - Geothermal Energy News 3 proyectos piloto de energía geotérmica desarrollados en Colombia.” <https://www.piensageotermia.com/3-proyectos-piloto-de-energia-geotermica-desarrollados-en-colombia/> (accessed Nov. 11, 2021).
- [6] “Comienzan pilotos de geotermia en Colombia.” <https://www.elheraldo.co/economia/comienzan-pilotos-de-geotermia-en-colombia-826348> (accessed Nov. 11, 2021).
- [7] “Se inauguró la primera central geotérmica de Colombia y pronto ingresarán dos más - Energía Estratégica.” <https://www.energiaestrategica.com/se-inauguro-la-primera-central-geotermica-de-colombia-y-pronto-ingresaran-dos-mas/> (accessed Nov. 11, 2021).
- [8] S. L. Mesa, J. M. Orjuela, A. T. Ortega Ramírez, and J.-A. Sandoval, “Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana,” *Gestión y Ambient.*, vol. 21, no. 1, pp. 87–98, 2018, doi: 10.15446/ga.v21n1.69792.
- [9] “El manejo del agua producida en la industria petrolera Argentina Por: Ing. Marcelo Hirschfeldt-Oil Production Consulting.”
- [10] “Ciclo Rankine.” <https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/44/html/rankine.html> (accessed Nov. 11, 2021).
- [11] Información tomada de una empresa privada de producción de hidrocarburos presente en la cuenca del Valle Medio del Magdalena (principio de confidencialidad).
- [12] “¿Qué es el ciclo de Rankine? Conversión de calor en trabajo.” <https://solar-energia.net/termodinamica/ciclos-termodinamicos/ciclo-rankine> (accessed Nov. 11, 2021).
- [13]. Continuación. “¿Qué es el ciclo de Rankine? Conversión de calor en trabajo.” <https://solar-energia.net/termodinamica/ciclos-termodinamicos/ciclo-rankine> (accessed Nov. 11, 2021).

- [14] “R-245fa es un hidrofluorocarbono HFC, refrigerante.” <https://es.climalife.dehon.com/r-245fa> (accessed Nov. 11, 2021).
- [15] “¿Qué es R245fa Pentafluoropropano o refrigerante R245fa o agente espumante R245fa? - Noticias - Xiamen Juda Trading Co., Ltd.” <http://m.fluorines-chemicals.com/news/what-is-r245fa-pentafluoropropano-or-refrigera-36859263.html> (accessed Nov. 11, 2021).
- [16] “▷ Huella de Carbono - Calcular, qué es, para qué sirve y medición.” <https://www.sinceo2.com/huella-carbono-calcular-medicion-empresas-inventario-emisiones/> (accessed Nov. 11, 2021).
- [17] “Huella de carbono: aprende a calcular tu impacto ambiental - Greenpeace México.” <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/9386/huella-de-carbono/> (accessed Nov. 11, 2021).
- [18] “Curso: Uso del paquete informático ASPEN-HYSYS, simulador de procesos químicos | Diplomado en Gestión de la Calidad del Aire y Control de la Contaminación Atmosférica | Universidad de Santiago de Chile.” <https://www.calidaddel aire.usach.cl/curso-uso-del-paquete-informatico-aspen-hysys-simulador-de-procesos-quimicos> (accessed Nov. 11, 2021).
- [19] “¿Qué es Aspen Hysys?” <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/07/que-es-aspen-hysys.html#Que-es-aspen-hysys> (accessed Nov. 11, 2021).
- [20] “¿Qué es la fórmula de eficiencia térmica? Definición.” <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-formula-de-eficiencia-termica-definicion/> (accessed Nov. 11, 2021).
- [21] “¿Cómo calcular el valor presente neto? Ejemplos - Rankia.” <https://www.rankia.cl/blog/analisis-ipsa/3892041-como-calcular-valor-presente-neto-ejemplos> (accessed Nov. 11, 2021).
- [22] “Tasa interna de retorno (TIR) | 2021 | Economipedia.” <https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html> (accessed Nov. 11, 2021).
- [23] “El índice beneficio/costo en las finanzas corporativas | Finanzas | Apuntes empresariales | ESAN.” <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2017/01/el-indice-beneficiocosto-en-las-finanzas-corporativas/> (accessed Nov. 11, 2021).
- [24] “2.1. Propiedades físico químicas | Materiales de uso técnico.” https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/esPropiedades_fisico_quimicas_del_agua. <https://es.slideshare.net/frankespulpo/propiedades-fsico-quimicas-del-agua> (accessed Nov. 11, 2021).
- [25] “Propiedades físicoquímicas del agua y su significado biológico - Unidad de Apoyo Para el Aprendizaje.” http://uapas2.bunam.unam.mx/ciencias/propiedades_fisicoquimicas_agua/ (accessed Nov. 11, 2021).
- [26] S. Judd *et al.*, “The size and performance of offshore produced water oil-removal technologies for reinjection,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 134, no. 134, pp. 241–246, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.seppur.2014.07.037.
- [27] “Propiedades físico químicas del agua.” <https://es.slideshare.net/frankespulpo/propiedades-fsico-quimicas-del-agua> (accessed Nov. 11, 2021).