

ANÁLISIS EXERGO-ECONÓMICO, TÉCNICO-ECONÓMICO Y AMBIENTAL DEL  
USO DE UN CICLO RANKINE ORGÁNICO APROVECHANDO LA  
DISPONIBILIDAD DE ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL MUNICIPIO DE PAIPA  
BOYACA.

DANIEL ANTONIO GALVIS CASAS  
LUIS CARLOS TRASLAVIÑA TRIANA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2021

ANÁLISIS EXERGO-ECONÓMICO, TÉCNICO-ECONÓMICO Y AMBIENTAL DEL  
USO DE UN CICLO RANKINE ORGÁNICO APROVECHANDO LA  
DISPONIBILIDAD DE ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL MUNICIPIO DE PAIPA  
BOYACA.

LUIS CARLOS TRASLAVIÑA TRIANA  
DANIEL ANTONIO GALVIS CASAS

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero mecánico

Director  
YESID JAVIER RUEDA ORDOÑEZ  
PhD. Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2021

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi mamá que tanto ha dado por mí

**Daniel Galvis**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi Familia por todo el apoyo y la paciencia brindada a lo largo de este camino. ***Daniel Galvis***

## CONTENIDO

	pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>3. Marco teórico</b>	<b>17</b>
3.1. Energía Geotérmica.	17
3.2. Participación energética.	20
3.3. Ciclo Rankine.	22
3.4. Evaporación	26
3.5. Expansión en la Turbina	26
3.6. Condensación	27
3.7. Compresión	27
3.8. Ciclo Rankine Orgánico (ORC).	27
3.8.1. Configuraciones de ORCs	29
3.9. Modelamiento termodinámico	31
3.9.1. Análisis energético. (Primera ley)	31
3.9.2. Análisis Exergíco. (Segunda ley)	33
3.10. Costos exergéticos en un sistema energético.	36
3.10.1. Costo exergético unitario.	37
3.10.2. Consumo exergético.	37
3.11. Fluido de trabajo.	38
<b>4. Metodología</b>	<b>42</b>
4.1. Termodinámica	42

4.2. Análisis Económico	46
4.2.1. Costo de los equipos	46
4.3. Impacto Ambiental	50
4.4. Simulaciones	51
4.4.1. Primera Simulación	51
4.4.2. Segunda Simulación	51
4.4.3. Tercera Simulación	52
4.4.4. Cuarta Simulación	52
4.4.5. Quinta Simulación	53
4.4.6. Sexta Simulación	54
<b>5. Análisis de Resultados</b>	<b>58</b>
5.1. Simulación 1	58
5.2. Simulación 2	59
5.3. Matrices de desempeño de los fluidos orgánicos	59
5.3.1. Cuarta Simulación	59
5.3.2. Sexta Simulación	67
5.3.3. Matriz de selección basándose en el costo total de inversión	73
5.3.4. Comparación de Paipa con las demás Cuencas	75
<b>6. Conclusiones</b>	<b>78</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>80</b>
<b>Apéndices</b>	<b>82</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Gradientes Geotermicos en el territorio Colombiano (ANH).	19
Figura 2. Capacidad geotérmica instalada en Sur y Centro de América.	22
Figura 3. Proyección geotérmica 2025.	23
Figura 4. Anillo de fuego.	24
Figura 5. Ciclo Rankine ideal.	25
Figura 6. Aplicación de tecnologías para aprovechamiento energético.	27
Figura 7. Ciclo ORCs de un solo nivel de presión.	30
Figura 8. Ciclo ORCs subcrítico con pentano.	30
Figura 9. Ciclo ORCs super critico.	31
Figura 10. Ciclo rankine organico.	32
Figura 11. Diferencia entre los diagramas T-S dependiendo del fluido de trabajo.	39
Figura 12. Clasificación de seguridad para los refrigerantes según ASHRAE estándar 34.	41
Figura 31. Eficiencia operacional R134a.	58
Figura 32. Matriz de desempeño R22 Paipa Boyaca \$/Kw.	60
Figura 33. Costos de la energía \$/Kw reportados en la literatura en función de la tecnología de producción.	61
Figura 34. Matriz de desempeño Water Paipa Boyaca \$/Kw.	62
Figura 35. Matriz de desempeño Water Paipa Boyaca \$/Kw.	63
Figura 36. Matriz de desempeño Water Paipa Boyaca Impacto Ambiental.	63
Figura 37. Matriz de desempeño R22 Paipa Boyaca Impacto Ambiental.	64
Figura 38. Matriz de desempeño R124 Paipa Boyaca Impacto Ambiental.	65
Figura 39. Matriz de desempeño R134a Paipa Boyaca Mega Watts producidos.	65

Figura 40. Matriz de desempeño del Agua en Paipa Boyacá Mega Watts producidos.	66
Figura 41. Matriz de seccion Paipa Boyacá.	68
Figura 42. Matriz de seccion Paipa Boyacá impacto ambiental.	70
Figura 43. Matriz de selección Paipa Boyacá miles de dolares por Kw.	71
Figura 44. Matriz de selección Paipa Boyacá Costo Total.	72
Figura 45. Matriz de selección Paipa Boyacá Mega Watts.	73
Figura 46. Matriz de selección Paipa Boyacá Costo Total.	74

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Variables que determinan el valor del componente	46
Tabla 2. Fluidos Utilizados en la simulación	50

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
Anexo A. Código de las funciones	82

## GLOSARIO

**Rankine** Es un sistema termodinámico cuyo objetivo es evaporar un fluido para producir energía mecánica en una turbina que es transformada en energía eléctrica.

**Energía Geotermica** Esta energía esta en forma de calor y es producida por el núcleo caliente de la tierra.

**Gradiente Geotermico** La variación de la temperatura respecto a la profundidad.

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS EXERGO-ECONÓMICO, TÉCNICO-ECONÓMICO Y AMBIENTAL DEL USO DE UN CICLO RANKINE ORGÁNICO APROVECHANDO LA DISPONIBILIDAD DE ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL MUNICIPIO DE PAIPA BOYACA. \*

**AUTOR:** DANIEL ANTONIO GALVIS CASAS & LUIS CARLOS TRASLAVIÑA \*\*

**PALABRAS CLAVE:** ENERGÍA GEOTÉRMICA ,IMPACTO AMBIENTAL ,RANKINE ORGÁNICO ,TECNO-ECONÓMICO, GRADIENTES GEOTERMICOS COLOMBIANOS.

### **DESCRIPCIÓN:**

El presente proyecto de grado presenta la creación de un modelo complejo termodinámico de un ciclo Rankine orgánico de 4 estados usando programación orientada a objetos con el lenguaje Python y librerías de código abierto. En el que se pueden calcular precios del Kw en función de la profundidad ,fluidos utilizados ,temperatura de la fuente ,eficiencias de maquinarias y otras variables de interés. Por medio de este y datos brindados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) se analizó y optimizo en función de múltiples variables la producción energética para Paipa Boyacá y cada una de las cuencas sedimentarias de Colombia.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Yesid Rueda Ordoñez PhD Ingeniero Mecanico

## Abstract

**Title:** EXERGO-ECONOMIC, TECHNICAL-ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF THE USE OF AN ORGANIC RANKINE CYCLE TAKING ADVANTAGE OF THE AVAILABILITY OF GEOTHERMAL ENERGY IN THE MUNICIPALITY OF PAIPA BOYACA. \*\*

**Author:** DANIEL ANTONIO GALVIS CASAS & LUIS CARLOS TRASLAVIÑA \*\*

**Keywords:** GEOTHERMAL ENERGY, ENVIRONMENTAL IMPACT, ORGANIC RANKINE, TECHNO-ECONOMIC, COLOMBIAN GEOTHERMAL GRADIENTS.

**Description:**

This degree project presents the creation of a complex thermodynamic model of a 4-state organic Rankine cycle using object-oriented programming with the Python language and open source libraries. In which Kw prices can be calculated based on depth, fluids used, source temperature, machinery efficiencies and other variables of interest. Through this and data provided by the National Hydrocarbons Agency (ANH), the energy production for Paipa Boyacá and each of the sedimentary basins of Colombia was analyzed and optimized based on multiple variables.

---

\*\* Degree Work

\*\* Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Yesid Rueda Ordoñez PhD Ingeniero Mecánico

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la búsqueda de fuentes de energía limpias y eficientes es un tema de gran importancia debido a la alta demanda de energía, explotación descontrolada de los recursos naturales y aumento desmesurado de la población. Por lo tanto, se empieza a buscar alternativas de generación de energía eléctrica. La energía geotérmica es una forma de bajo impacto ambiental y confiable como generador de electricidad. Colombia a pesar de ser uno de los países con más potencial geotérmico del mundo también es uno de los países con menos desarrollo y aprovechamiento de esta tecnología.

Se investigó la producción de energía eléctrica usando un ORC (Organic Rankine Cycle) alimentado con una fuente de energía geotérmica de baja temperatura en Paipa Boyacá y comparándolo con diferentes alternativas a lo largo del territorio colombiano.

Para comparar todas las alternativas y las posibilidades del modelo usado, el cual es un ciclo Rankine básico subcrítico, se modeló en el lenguaje de programación Python usando librerías como Coolprop para el manejo de las propiedades termodinámicas y la librería Pandas para poder llevar a cabo la manipulación de grandes cantidades de datos.

En el modelo los factores que se tuvieron en cuenta para la comparación de las diferentes situaciones y posibilidades que podían variar en función de su ubicación geográfica, varían desde la eficiencia en aprovechamiento energético desde un punto de vista en la primera y segunda ley de la termodinámica con el fin de tener una visión más amplia en los procesos presentes en el ciclo Rankine.

Además, el desarrollo de estas nuevas tecnologías contribuye al mejoramiento y conservación del medio ambiente, donde las variables a tener cuenta fue la profundidad de excavación a la que se necesita llegar para obtener cierto potencial térmico en el agua extraída y el fluido de trabajo del ciclo Rankine ya que puede llegar a emitir partículas contaminantes al medio ambiente. En el modelo se usaron diferentes fluidos como secos, isotrópicos, orgánicos y entre otros, con el fin de seleccionar el mejor fluido.

Se analizaron las diferentes variables del ciclo Rankine como presiones, temperaturas de entrada y fluido de trabajo, como así mismo los costos exergo económicos y termo económicos permitiendo evaluar el desempeño operacional ante diferentes condiciones, optimizando condiciones de operación buscando la factibilidad de la planta teniendo en cuenta el mercado de la energía eléctrica y la disponibilidad del recurso geotérmico.

Por último, se realizó un análisis de precios para cada situación y costo de un Kw por dólar, el análisis se realizó en función de la dimensión de los componentes del ciclo Rankine y el precio del fluido de trabajo.

## **2. OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar la viabilidad exergo económica, técnico económica y ambiental para la generación de energía eléctrica, implementado un ciclo rankine orgánico accionado por una fuente geotérmica de calor.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar técnico económicamente el ciclo Rankine orgánico con el fin de lograr la mayor eficiencia posible por medio de la primera y segunda ley de la termodinámica ligado a la ingeniería económica.
- Realizar un estudio de impacto ambiental en el municipio de Paipa Boyaca para determinar los efectos causados por el proyecto desde el punto de vista ambiental.
- Modelar el sistema matemáticamente con el fin de determinar el punto de operación óptimo para todo el proceso.
- Determinar la viabilidad de generación de energía eléctrica aprovechando la energía geotérmica en Paipa Boyaca comparándolo con otras técnicas de generación de energía eléctrica.

### **3. Marco teórico**

#### **3.1. Energía Geotérmica.**

La energía geotérmica es la energía en forma de calor producida por el núcleo caliente de la tierra y que calienta las placas tectónicas de las profundidades en donde generalmente se acumula agua que es calentada a altas temperaturas dependiendo de la profundidad a la que se encuentre ,entre más profundidad las temperaturas incrementan haciendo mayor la calidad de esta fuente.

Para aprovechar el calor generado por la tierra se bombea el agua desde las profundidades a las que se excava para extraer el líquido ,la energía que transporta el agua extraída es transferida por medio de intercambiadores de calor transfiriendo a otro fluido que puede ser o no orgánico ,sería el fluido de trabajo del ciclo Rankine que posteriormente va a ser transformado en trabajo de flecha en un eje que va a ser transmitido a un generador para producir electricidad.

Esta forma de generar electricidad es una de las mejores tecnologías ,esta brinda una disponibilidad del recurso durante todo el año casi sin variaciones ,esto la hace muy confiable frente a otras tecnologías que dependen de otros factores más variables y cuya producción energética puede variar en gran cantidad a lo largo del año ,este tipo de tecnología también se puede clasificar en las fuentes de energía renovables, ya que el agua extraída generalmente es re-inyectada para no alterar los procesos naturales en gran manera ,otra característica de esta es la baja huella ambiental que genera comparada con el gas natural es 20 veces menos generadoras de partículas contaminantes (50 g CO<sub>2</sub> eq/kWh) ,esto la hace una de las mejores

alternativas en la generación de energía eléctrica de las disponibles.<sup>1</sup>

Actualmente Estados Unidos es el país con mas capacidad de energía geotérmica instalada en el mundo ,Cuenta con 3.8 Gw de energía .Actualmente la matriz energética colombiana depende en un 68% de la energía producida hidráulicamente que es una tecnología limpia y eficiente , pero que depende del clima y debido a su gran tamaño de infraestructura que necesita puede llegar a afectar gravemente el medio ambiente.Desde este punto de vista la energía geotérmica tiene el potencial de hacer un gran aporte a la matriz energética colombiana.

La energía geotérmica es el calor natural emanado por la tierra, se estima que en el centro del planeta las temperaturas son de 5500° C. Este calor proviene de la misma formación del planeta tierra, esta energía es transferida a la superficie por medio de conducción y convección.

Inicialmente se usaba para labores domésticas donde se aprovechaba el calor para diferentes tareas a partir del siglo 20 fue donde se empezó a desarrollar tecnologías para el aprovechamiento del calor y transformarlo en energía eléctrica.<sup>1</sup>

Esta energía puede ser captada en la superficie en lugares donde naturalmente con el paso de los años ha logrado atravesar de la corteza terrestre, Esto generalmente ocurre en lugares donde hay volcanes.

Clasificación de la energía geotérmica.

- Energía geotérmica de alta temperatura. (150°c - 400°c) Este tipo de energía geotérmica es la de más potencial al ser de tan alta temperatura es ideal para

---

<sup>1</sup> Matthew. *Capturando el potencial geotérmico en América Latina y El Caribe: Una perspectiva del camino a seguir.* 2020.



producir electricidad.

- Energía geotérmica de temperaturas medias. (70 °c - 150 °c) Al igual que la de alta temperatura también es buena fuente para la producción de electricidad, aunque a menor medida, también es usada en sistemas de calefacción urbanos e industriales.
- Energía geotérmica de baja temperatura. (30 °c - 70 °c) En este rango de temperaturas el aprovechamiento en cuanto a la conversión a energía eléctrica pasa a ser un poco más difícil y se presenta la necesidad de aplicar otras técnicas a las usadas en las fuentes de alta y media temperatura, aun así, es aprovechable tanto para la producción de electricidad como el uso del calor para labores domésticas o industriales.
- Energía geotérmica de muy baja temperatura. (20 °c - 30 °c) Estas fuentes de calor se usan aprovechándolas para el intercambio térmico para sistemas de aires acondicionados o como bombas de calor.

### **3.2. Participación energética.**

Desde la prehistoria los humanos se han asentado en lugares geotérmicamente activos para aprovechar el calor emanado por la tierra para el uso en labores de cocina y así su participación en la civilización humana se remonta desde los inicios de los tiempos, pero no fue hasta 1904 en Larderello Italia Piero Ginori Conti enciende una bombilla aprovechando la energía geotérmica con un motor y un dinamo. La primera planta se construye en 1913 con una potencia de 250 KW, en 1950 se alcanzan 300 MW en Italia en el yacimiento de Landareello ,en 1958 comienza la producción de energía eléctrica extraída de energía térmica en Nueva Zelanda y así fue avanzando el uso de la energía geotérmica para producir calor en el mundo. En 1973 cuando ocurre la primera crisis del petróleo se les da gran importancia a las fuentes

de energía alternas, este interés produce una gran expansión en el uso y desarrollo de la energía geotérmica en el mundo.<sup>2</sup>

América Latina y el Caribe son una gran promesa para el desarrollo de la energía geotérmica. La región tiene un potencial geotérmico de entre 11 GW y 55 GW (Berman, 2018). que permanece en su mayoría sin explotar. Sin embargo, con algunas excepciones notables como México, El Salvador y Costa Rica, por ejemplo, el progreso ha sido lento. En la actualidad solo México, América Central, el Caribe y Chile tienen plantas operativas de generación de energía con una capacidad instalada que apenas supera los 1,7 GW.<sup>2</sup>

A pesar del potencial energético con el que cuenta la región de sur y centro América el aprovechamiento del recurso geotérmico se ve muy retrasado frente a otras regiones del planeta, el poco desarrollo de esta tecnología en la región se debe a los precios y la dificultad en la realización de estos proyectos.<sup>3</sup>

Como podemos observar Sur y Centro América son las regiones con menos desarrollo de la energía geotérmica a pesar de tener gran potencial geotérmico esta tecnología no es aprovechada en la región. Lamentablemente la energía geotérmica no tiene participación en Colombia solo se cuenta con proyectos a futuro a pesar de que el país tiene gran capacidad de utilización de este recurso.

Actualmente Chile es el país de la región que tiene más desarrollo de esta tecnología aun siendo poco comparado con países de otras regiones con menos potencial

---

<sup>2</sup> Square. *Statistical Review of World Energy*. 2021.

<sup>3</sup> Mentor. *Essential to sustainable growth*. 2016.

Figura 2. Capacidad geotérmica instalada en Sur y Centro de América.



Fuente: Aragon. *Capturando el potencial geotermico en America latina y el caribe.* 2020

geotérmico, pero con mayor aprovechamiento. La energía geotérmica está tomando protagonismo en la participación energética mundial debido a la confiabilidad del recurso. Sur América tiene un gran potencial geotérmico al estar ubicada en el anillo de fuego y contar con gran actividad volcánica.

### 3.3. Ciclo Rankine.

Es un ciclo de potencia usado para producir trabajo que es transformado en energía eléctrica, para lograr esto un fluido de trabajo es llevado a diferentes fases a lo largo de todo el proceso, generalmente el fluido usado es el agua que es un fluido húme-

Figura 3. Proyección geotérmica 2025.

Country	2016	2025	>2025**
Australia	0.8	0.8	462.5
Chile	-	98	298
China	28.4	28.43	98.4
Costa Rica	213.5	368.5	368.5
Croacia	-	16.5	36.5
El Salvador	204.4	204.2	304.4
Ethiopia	8.5	178.5	278.5
Germany	13.2	13.2	66.1
Guatemala	54.2	54.2	134.2
Iceland	612.4	752.4	1 322.4
Indonesia	1 468.9	3 410.7	4 270.2
Italy	946.4	946.4	1 142.4
Japan	545.5	612.0	935.7
Kenya	617.16	932.16	1 247.2
Mexico	882.9	957.9	1 252.9
New Zealand	1 058.8	1 128.8	1 483.8
Nicaragua	133.2	190.2	412.2
Papua New Guinea	56	56	166
Philippines	1 943.4	2 104.4	2 834.4
Portugal	27.8	27.8	53.8
Russian Federation	95.2	95.2	150.2
Turkey	409.3	721.6	997.6
USA	3 490.3	3 874.3	5 425.3

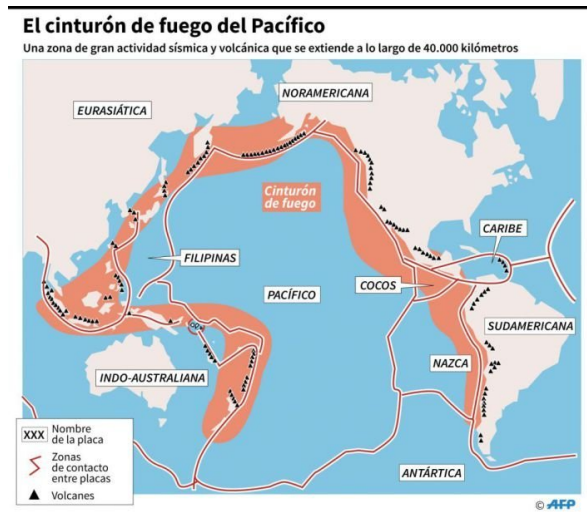
Fuente: Mentor. *Essential to sustainable growth*. 2016

do, este es usado en centrales nucleares, el agua brinda un gran rango de operación siendo apta casi para todo tipo de fuente térmica. Para fuentes de baja temperatura se usan fluidos de trabajo orgánicos que brindan mejores resultados en su rango de operación frente al agua.

El Ciclo Rankine más básico consta de 4 procesos en los que el fluido de trabajo es condensada después de salir de la turbina después de condensado se somete a un proceso de compresión elevando la presión del fluido a la temperatura máxima de trabajo del ciclo una vez elevada la presión el fluido este se lleva a un intercambiador en donde se le inyectara calor para evaporar el fluido en este estado con un gran potencial energético es ingresado en una turbina que al expandirse produce un cambio en la cantidad de movimiento empujando las aspas de la turbina y ésta producirá trabajo de flecha en un eje. Ver figura

Estos ciclos Rankine pueden lograr una eficiencia máxima dependiendo del ambien-

Figura 4. Anillo de fuego.

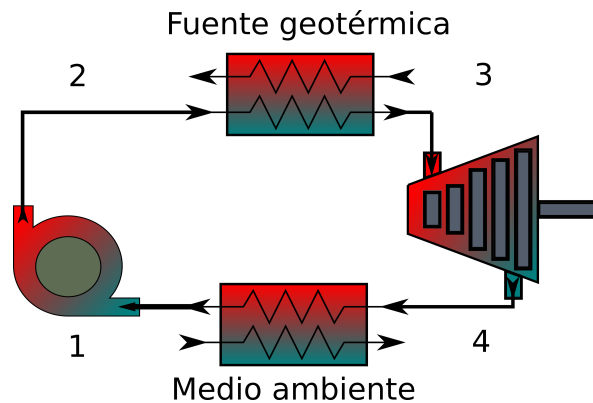


Fuente: Monica. *Un sismo "despertó el Anillo de fuego": ¿hay algo de qué preocuparse?* 2018

te en el que operen y de la fuente, está acotado por la eficiencia de Carnot siendo esta la eficiencia máxima a la que puede aspirar un ciclo de estos ,por ende entre más alta sea la temperatura de la fuente geotérmica mejor va a ser la eficiencia a la hora de producir trabajo de flecha en el ciclo y pues el sumidero con el que se condensa el fluido de trabajo que generalmente esta temperatura es la misma que la del ambiente.

Para aprovechar el calor generado por el núcleo terráqueo constantemente a lo largo de todos los días del año se decidió modelar la producción de energía eléctrica mediante una planta de potencia basada en el ciclo Rankine subcrítico de 4 estados. Termodinámicamente cuenta con 4 procesos en los que no se han tenido en cuenta las pérdidas de presión y calor en las tuberías ,para los intercambiadores de calor no se ha considerado las variaciones en la temperatura del agua proveniente del fondo de la tierra que en este caso es la fuente de energía térmica a aprovechar ,en

Figura 5. Ciclo Rankine ideal.



Fuente: propia

transferencia de calor para los intercambiadores se ha considerado un coeficiente global de transferencia de calor constante entre un fluido húmedo y uno orgánico esto sin tener en cuenta diámetros de tuberías ni materiales del intercambiador, estas simplificaciones en cuanto a la transferencia de calor se hicieron con el fin de darle más libertad a la capacidad de variar los componentes del ciclo en los modelos económicos que tienen en cuenta el área del intercambiador.<sup>4</sup>

Para los compresores y las turbinas se tomó una eficiencia basada en las irreversibilidades, en estos elementos no se consideraron pérdidas de presión.

El proceso inicia con la extracción del agua de la fuente que depende de la profundidad y los gradientes geotérmicos de la zona en específico estudiada entre más profundidad sea la que se extraiga el fluido se va a poder tener una mayor temperatura de la fuente que aumenta la eficiencia del ciclo y la capacidad de generar energía, teniendo en cuenta que el precio de excavación influirá en la inversión ne-

---

<sup>4</sup> Fandiño. *Ciclo de Rankine*. 2013.

cesaria para hacer determinado proyecto.

Una vez el agua es extraída esta es pasada por el intercambiador del ciclo Rankine exactamente el evaporador donde el calor es transmitido al fluido de trabajo del ciclo que puede ser cualquier fluido orgánico, en el intercambiador el fluido orgánico sufre un cambio de fase y pasa de ser líquido saturado ser un vapor que será insertado en la turbina en donde el fluido caerá de presión a la presión mínima del ciclo. En esta etapa la turbina produce el trabajo de flecha que será transmitido a un generador eléctrico y después será transformado en energía eléctrica.

Una vez el fluido sale de la turbina a baja presión este se encuentra en un estado gaseoso y pasará al condensador donde sufrirá otra transformación, se condensa hasta que sea apto para ser comprimido en su última etapa.

### 3.4. Evaporación

$$Q_{\text{evaporador}} = (h_{\text{salida}} - h_{\text{entrada}}) * \dot{m} \quad (1)$$

### 3.5. Expansión en la Turbina

$$W_{\text{turbina}} = (h_{\text{entrada}} - h_{\text{salida}}) * \dot{m} \quad (2)$$

$$\eta_{\text{isentropica}} = \frac{h_{\text{entrada}} - h_{\text{salida}_r}}{h_{\text{entrada}} - h_{\text{salida}_s}} \quad (3)$$

### 3.6. Condensación

$$Q_{\text{condensador}} = (h_{\text{entrada}} - h_{\text{salida}}) * \dot{m} \quad (4)$$

### 3.7. Compresión

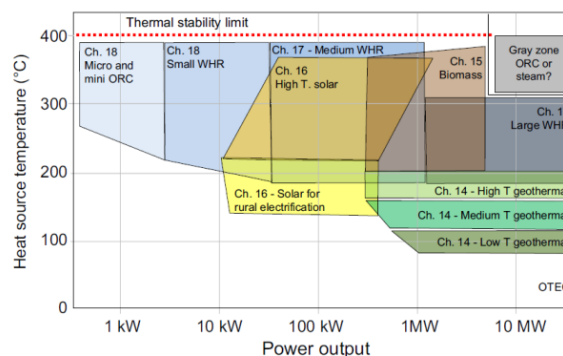
$$W_{\text{compresin}} = (h_{\text{salida}} - h_{\text{entrada}}) * \dot{m} \quad (5)$$

$$\eta_{\text{compresin}} = \frac{h_{\text{ss}} - h_{\text{entrada}}}{h_{\text{salida}} - h_{\text{entrada}}} \quad (6)$$

### 3.8. Ciclo Rankine Orgánico (ORC).

El ciclo Orgánico de Rankine es una tecnología desarrollada para aprovechar todo tipo de fuentes de calor para la producción de energía eléctrica es altamente utilizado en fuentes térmicas de bajo/medio grado de temperatura, está acotado por la eficiencia del ciclo de Carnot, la eficiencia de estos ciclos tiende a ser muy baja debido a los componentes en los que se presentan grandes irreversibilidades.<sup>4</sup>

Figura 6. Aplicación de tecnologías para aprovechamiento energético.



Fuente : Macchi. *FOrganic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*. 2016

Los componentes de estos ciclos son:

Intercambiadores de Calor: Son parte fundamental del ORC se usan para la transferencia de calor entre la fuente que se quiere aprovechar este intercambiador es el principal, también se usan para condensar el fluido haciendo el intercambio con el ambiente, en algunos casos se agrega otro intercambiador para recuperar el calor que necesita ser extraído para la condensación del fluido.

Normalmente los intercambiadores más usados para los ORCs son los de coraza y tubos para aplicaciones como las de aprovechamiento geotérmico se recomienda enviar el agua extraída de la tierra por los tubos por facilidad a la hora de hacer mantenimiento al intercambiador. Estos intercambiadores están acotados bajo la norma del tema que dicta las dimensiones que debe tener cada intercambiador para cada caso.

También son usados evaporadores y condensadores enfriados por agua estos generalmente se usan en plantas de gran tamaño son mucho más costosos que los de coraza y tubo. Cuando no hay agua para enfriar el fluido la única opción que queda es con condensadores enfriados por aire. Los recuperadores de calor son usados en aplicaciones en las que se cuenta con una fuente de calor de alta temperatura, estos se usan para calentar el fluido que va hacia el intercambiador principal y de paso reducir la temperatura del fluido que va a entrar a condensador.

Expansores volumétricos: En estos expansores el fluido se expande y se descarga, son parte fundamental de proceso ya que de aquí es donde se produce el trabajo de flecha que va a ser transmitido al generador.

Otra parte de los ORCs son las bombas que generalmente se usan centrifugas de multi-etapa, este componente depende de que fluido se use y que rango de operación tenga el ciclo, hay que poner gran atención a la eficiencia que desarrolle ya que afecta en gran medida el funcionamiento en general del ciclo de potencia.

**3.8.1. Configuraciones de ORCs** Las configuraciones más usadas para ORCs se dividen en dos categorías que son las de un solo nivel de presión y las que tienen varios niveles de presión.

#### **Ciclos de un solo nivel de presión.**

Como su nombre lo indica los Ciclos Rankine orgánicos de un solo nivel de presión, únicamente varían la presión durante todo el ciclo una vez, estos ciclos se dividen en los subcríticos y los críticos. Estos ciclos requieren de muy pocos componentes generalmente se usa una bomba, intercambiador de calor, condensador y una turbina, en otro tipo de configuración se puede agregar otro intercambiador de calor para que recupere calor del mismo fluido de trabajo.

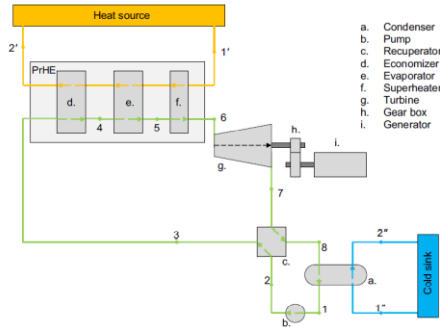
#### **Subcríticos**

Los ciclos orgánicos subcríticos en ninguna parte del proceso se supera la temperatura crítica del fluido, se usan en aplicaciones de aprovechamiento de energía geotérmica, recuperación de calor industrial, para plantas de uso doméstico y combustión de biomasa.<sup>5</sup>

---

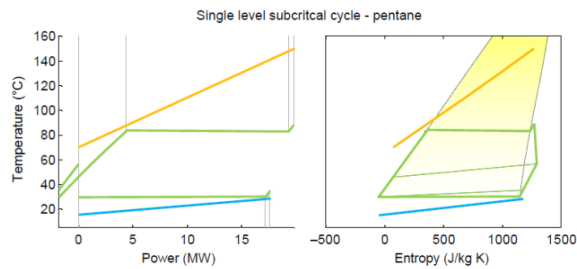
<sup>5</sup> Macchi. *FOrganic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*. 2016.

Figura 7. Ciclo ORCs de un solo nivel de presión.



Fuente:Macchi. *FOrganic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*. 2016

Figura 8. Ciclo ORCs subcrítico con pentano.



Fuente:Macchi. *FOrganic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*. 2016

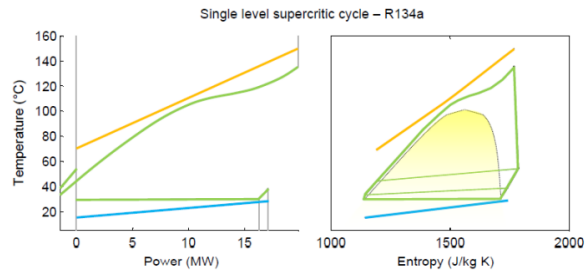
### Super Críticos.

Son ciclos en los que se supera la temperatura crítica del fluido de trabajo por lo general son mas costosos que los subcríticos debido a la calidad y dimensiones que necesitan tener sus componentes debido a las condiciones de operación. A pesar de ser mas costosos estos ciclos tienen mejor eficiencia que los subcríticos.

### Ciclos de múltiples niveles de presión.

Este ciclo consta de varios niveles de presión y puede lograr mas eficiencia que uno de única presión subcrítico a pesar de esto es menos utilizado por la cantidad de componentes que tiene y que la configuración para realizar uno es mucho más

Figura 9. Ciclo ORCs super crítico.



Fuente: Macchi. *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*. 2016

compleja. Todos los ciclos de presión múltiples son subcríticos.

### 3.9. Modelamiento termodinámico

El modelamiento termodinámico se divide en dos partes como se muestra a continuación:

#### 3.9.1. Análisis energético. (Primera ley)

##### Balance de energía para todo el sistema.

Para un sistema ORCs básico se realiza un balance de energía general del sistema donde se debe tener en cuenta los flujos de energía que hay en el, dando como resultado la siguiente ecuación 7.

$$(Q_e - Q_s) + (W_e - W_s) = h_s - h_e \quad (7)$$

El balance de energía depende de:

$Q_e$  calor de entrada.

$Q_s$  calor de salida.

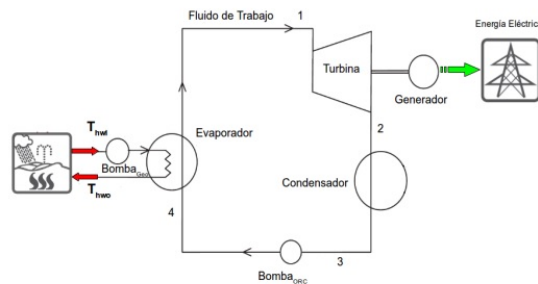
$W_e$  trabajo de entrada.

$W_s$  trabajo de salida.

$h_e$  entalpía de entrada.

$h_s$  entalpía de salida.

Figura 10. Ciclo rankine organico.



Fuente:Arrieta. *OPTIMIZACION DE UN CICLO ORGANICO DE RANKINE (ORC) USANDO RECURSOS GEOTERMALES DE BAJA ENTALPIA*. 2012

### Balance de energía en la bomba.

Para la bomba se debe tener en cuenta la eficiencia que da el fabricante para el rango de funcionamiento a la hora de realizar los cálculos termodinámicos para encontrar el estado real al que va a salir el fluido.

$$W_{\text{bomba entrada}} = h_{4r} - h_3 = v * (P_3 - P_4) \quad (8)$$

$$\eta_{\text{Bomba}} = \frac{W_s}{W_r} = \frac{h_3 - h_{4r}}{h_3 - h_{4s}} \quad (9)$$

### Calor de entrada en el intercambiador.

$$Q_{\text{entrada}} = h_1 - h_4 \quad (10)$$

### Trabajo isentrópico de la turbina.

Al igual que en la bomba se debe tener en cuenta la eficiencia que el fabricante da sobre la turbina y sobre los rangos de funcionamiento y operación de la turbina para poder determinar el estado real a la salida de la turbina.

$$W_{\text{turbina salida}} = h_1 - h_{2r} \quad (11)$$

$$\eta_{\text{Turbina}} = \frac{w_r}{w_s} = \frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_{2s}} \quad (12)$$

### Calor de salida en el condensador.

$$q_{\text{salida}} = h_2 - h_3 \quad (13)$$

### Eficiencia según la ley de la conservación de la energía para el ciclo Rankine.

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{W_{\text{neto}}}{q_{\text{entrada}}} = 1 - \frac{q_{\text{salida}}}{q_{\text{entrada}}} \quad (14)$$

### 3.9.2. Análisis Exergico. (Segunda ley)

Modelamiento exergetico se basa en realizar un balance de exergía en cada componente del sistema, para saber cuánta exergía o potencial de trabajo va a ser des-

truido en cada componente con el fin de lograr una optimización en función del aprovechamiento energético.

**Bomba.**

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - [W - P_0 (V_2 - V_1)] + \sum_{ent} m\psi - \sum_{sal} m\psi - X_{destruida} = X_3 - X_4 \quad (15)$$

Donde:

$Q_k$  Transferencia de calor a través de la frontera

$\psi$  Exergía de flujo

$m$  flujo másico del sistema

$X_{destruida}$  Exergía destruida del componente

$X_2 - X_1$  Tasa de cambio de Exergía

Con anlysis en la bomba se tiene:

$$X_{Destruida} = W_{compresor} + m (\Psi_{entrada} - \Psi_{salida}) \quad (16)$$

$$X_{Destruida} = W_{entrada_{compresor}} + [(h_3 - h_4) - T_0 (s_3 - s_4)] \quad (17)$$

$$X_{Destruida} = h_3 - h_1 + [(h_3 - h_4) - T_0 (s_3 - s_4)] \quad (18)$$

En un sistema isentrópico o ideal la exergía destruida en la bomba es de 0.

**Turbina.**

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - [W - P_0 (V_2 - V_1)] + \sum_{ent} m\psi - \sum_{sal} m\psi - X_{destruida} = X_1 - X_2 \quad (19)$$

$$X_{\text{Destruida}} = -W_{\text{salida turbina}} + m (\Psi_{\text{entrada}} - \Psi_{\text{salida}}) \quad (20)$$

$$X_{\text{Destruida}} = -h_3 + h_4 + [(h_3 - h_4) - T_0 (s_3 - s_4)] \quad (21)$$

Si el proceso es ideal la exergía destruida en el proceso es de 0.

### Intercambiador de calor.

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - [W - P_0 (V_2 - V_1)] + \sum_{\text{ent}} m\psi - \sum_{\text{sal}} m\psi - X_{\text{destruida}} = X_4 - X_1 \quad (22)$$

$$\left(Q_{\text{entrada}} \left(1 - \frac{T_0}{T_h}\right)\right) + m\psi_e - m\psi_s - X_{\text{Destruida}} = 0 \quad (23)$$

$$X_{\text{Destruida}} = (Q_{\text{entrada}}) \left(1 - \frac{T_0}{T_h}\right) + m (\Psi_{\text{entrada}} - \Psi_{\text{Salida}}) \quad (24)$$

### Condensador.

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - [W - P_0 (V_2 - V_1)] + \sum_{\text{ent}} m\psi - \sum_{\text{sal}} m\psi - X_{\text{destruida}} = X_2 - X_3 \quad (25)$$

$$X_{\text{Destruida}} = - \left(Q_{\text{salida}} \left(1 - \frac{T_0}{T_L}\right)\right) + m\psi_e - m\psi_s \quad (26)$$

### 3.10. Costos exergéticos en un sistema energético.

Los costos exergéticos en un sistema energético, se realizan cuando se han definido su estructura física, productiva y flujos de exergía. El costo exergético está relacionado con la eficiencia exergética de un proceso o equipos a los cuales queremos analizar, se define como:

$$k = \frac{1}{\varepsilon} = \sum \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_P} \quad (27)$$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_R} = 1 - \frac{E_{pe} + E_D}{E_R} \quad (28)$$

donde,

$\varepsilon$  Eficiencia exergetica

$\varepsilon_R$  Eficiencia del recurso

$\varepsilon_P$  Eficiencia del producto

$E_{pe}$  Exergía del producto

$E_D$  Exergía del destruida

$E_R$  Exergía del residuo

Con el análisis se concluye el costo exergético es el inverso de la eficiencia exergética. Este costo indica la cantidad de exergía requerida en un proceso para tener una unidad de producto. El valor siempre es mayor o igual a 1, y es 1 solamente cuando se tiene un proceso reversible.<sup>(6)</sup>

---

<sup>6</sup> Bosch. *Modelo termo económico de una central térmica de ciclo combinado*. 2007.

A la hora de calcular el costo exergéticos se encuentran diferentes tipos de costos que son necesarios calcularlos:

### 3.10.1. Costo exergético unitario. .

El costo indica la cantidad de exergía requerida como recurso para producir una unidad de exergía dando un producto. Estos costos van en aumento según el comportamiento del proceso puede que sean más complejos o ineficiente conforme a esto se produce un determinado flujo de un sistema energético. Ver ecuación.(<sup>7</sup>)

$$k_P = k_R * k_n \quad (29)$$

Donde:

$k_P$  Costo exergético unitario del prducto

$k_R$  Costo exergético unitario del residuo

$k_n$  Constantes de Costos unitarios en los productos

En cada equipo se describe una ecuación para el balance de costos exergéticos. Después de obtener los costos exergéticos se aplica otra ecuación para poder encontrar los consumos exergéticos.

### 3.10.2. Consumo exergético. .

---

<sup>7</sup> Leyte. *Análisis de costos de operación exergoeconómicos a un ciclo teórico de refrigeración por compresión de vapor usando HFC-134a*. 2012.

El consumo exergetico es la cantidad de exergía que se contiene en el producto, a todo esto, se le suman las irreversibilidades presentes en la producción, donde se denomina el recurso exergetico suministrado. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E^* = k^* * \dot{E} \quad (30)$$

donde:

$E^*$  Costo exergetico

$k^*$  Producto del costo exergetico unitario

$\dot{E}$  Flujo de Exergía

y a continuación costos exergeticoeconomicos:(7)

$$C_E = c * \dot{E} \quad (31)$$

$C_E$  costos exergeticoeconomicos

$c$  Producto del costo exergeticoeconomico unitario

$\dot{E}$  Flujo de Exergía

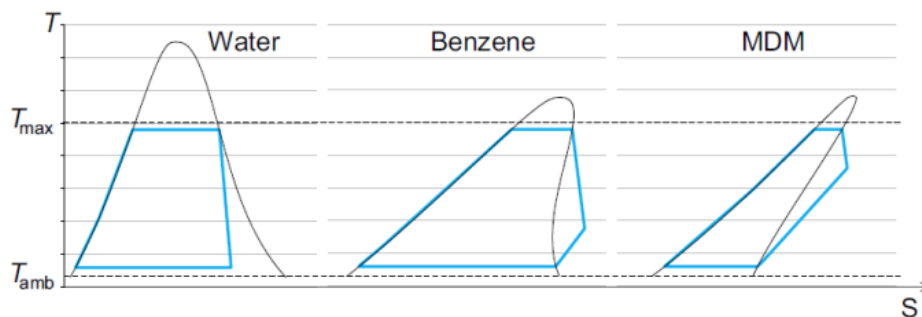
### 3.11. Flujo de trabajo.

El uso del fluido de trabajo en el ciclo ORC influye en el desempeño y rango de funcionamiento del ciclo notablemente, la utilización de fluidos orgánicos en vez de agua tiene fundamento en muchas razones los ciclos Rankine que funcionan con

agua son muchas costosos y complejos por ende se soluciona esto con fluidos de masa molecular alta, estructura molecular alta y presión crítica menor.<sup>8</sup>

Cambiando estas variables afecta el ciclo en varias formas, la primera es que la inclinación de el diagrama T-S es diferente al de un fluido con moléculas más simples a esto se le llama expansión seca, por segundo incrementa el precalentamiento del fluido con respecto a la fase de evaporación por último la importancia de enfriar en la fase de extraer el calor.

Figura 11. Diferencia entre los diagramas T-S dependiendo del fluido de trabajo.



Fuente :Macchi. *FOrganic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*. 2016

Los fluidos orgánicos utilizados en un ciclo Rankine deben cumplir con ciertas características estas no se deben cumplir necesariamente, pero es recomendable que el fluido de trabajo las cumpla, recomiendan que tenga disponibilidad comercial localmente a un precio razonable, No inflamable: se puede usar un fluido inflamable, pero esto complicaría un poco el proceso e incrementarían los costos, No toxico, Compatible con los materiales, Ambientalmente amigable.

<sup>8</sup> Ernesto Sanchez. *Optimización termica y economica de un ciclo rankine organico que aprovecha el calor residual de los motores de combustión interna*. 2021.

La selección del fluido de trabajo en un ciclo Rankine orgánico se considera importante a la hora de analizar tanto económica como técnica, teniendo en cuenta sus características termodinámicas ya que influyen en su costo, potencia neta y su eficiencia del ciclo. Además, otros aspectos a tener en cuenta como impacto ambiental, condiciones de operación, seguridad. Para este trabajo se realizó la investigación de diferentes fluidos tanto comercialmente como disponibilidad, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:<sup>8</sup>

- Potencial de destrucción de ozono (ODP): Cerca de 0, no mayor a 0.5.<sup>(9)</sup>
- Potencial de calentamiento global (GWP): Valores menores a 1500.<sup>(10)</sup>
- Clasificación de seguridad (ASHRAE standar 34): El fluido no debe estar en B3 (Ver figura 10).<sup>8</sup>

Teniendo en cuenta las consideraciones y la investigación en diferentes artículos se hara la selección de 5 fluidos de trabajo para la simulación del ciclo Rankine orgánico.

---

<sup>9</sup> IDEAM. *Formación y destrucción del ozono estratosférico*. 2004.

<sup>10</sup> Ernesto Sanguinetti. *Efecto de los refrigerantes en el Calentamiento Atmosférico: Huella de Carbono y Potencial de Calentamiento Atmosférico*. 2021.

Figura 12. Clasificación de seguridad para los refrigerantes según ASHRAE estándar 34.

		SAFETY GROUP	
F I L A M M A B I L I T Y	Higher Flammability	A3	B3
	Lower Flammability	A2 A2L	B2 B2L
	No Flame Propagation	A1	B1
		Lower Toxicity	Higher Toxicity
		INCREASING TOXICITY	

Fuente:Ernesto Sanchez. *Optimización termica y economica de un ciclo rankine organico que aprovecha el calor residual de los motores de combustión interna.* 2021

## 4. Metodología

### 4.1. Termodinámica

Primero se buscaron los datos relacionados con las características geotérmicas de Paipa Boyacá en este proceso se adquirieron los datos por parte de muestras recolectadas por Ingeominas y la agencia nacional de hidrocarburos (ANH) en donde se tomaron muestras 4.414 pozos en las cuencas sedimentarias del país.

Figura 13. Cuencas geotérmicas .

Cuenca	No. de pozos	Gradiente Geotérmico (°C/km)		Profundidades (m)
		Mínimo	Máximo	
VMM	2.331	6,8	65,4	500 - 4.816
Llanos Orientales	600	8,2	84,2	515 - 6.273
VSM	484	11,2	75,6	516 - 4.090
Catatumbo	422	9,2	54,1	503 - 3.741
Caguán-Putumayo	195	5,0	64,6	530 - 3.702
VIM	137	9,5	31,4	750 - 4.403
Cordillera Oriental	112	12,9	53,4	568 - 5.843
Sinú - San Jacinto	54	14,4	60,5	518 - 3.967
Guajira Offshore	22	12,4	27,6	927 - 5.456
Guajira	17	15,2	24,3	1.212 - 2.961
Sinú Offshore	9	11,8	24,3	1.725 - 4.602
Área no prospectiva	8	16,2	139,6*	759 - 5.239
Cesar - Ranchería	6	22,7	43,7	565 - 3.371
Urabá	5	14,4	25,6	616 - 3.688
Chocó	4	14,0	18,2	1.982 - 4.734
Exterior	3	6,8	26,4	2.771 - 3.017
Cauca - Patía	2	13,9	25,0	1.532 - 3.091
Tumaco	2	15,1	18,4	2.374 - 4.355
Los Cayos	1	28,5		2.051
Tumaco Offshore	1	13,5		993

Fuente : *Mapa preeliminar de gradientes geotermicos colombianos*

Esta adquisición de datos brinda los gradientes geotérmicos en la mayoría del territorio colombiano, gradientes geotérmicos que en algunas regiones llegan hasta 140°C/km, Para el análisis de Paipa Boyacá que ubicado en la cuenca sedimentaria de la cordillera oriental se realizó la medición en 112 pozos que dan evidencia de variaciones en el gradiente que van desde 12.9°C/km a 53.4°C/km a profundidades

de 568 m a 5843 m.<sup>11</sup>

Basándose en los datos brindados por la investigación realizada por AHN y Ingeominas se procedió a determinar el potencial geotérmico de Paipa por medio del aprovechamiento del calor con un ciclo Rankine Básico de 4 estados y comparándolo con las demás cuencas en el territorio colombiano.

Una vez adquiridos todos los datos relacionados con la ubicación, gradientes térmicos y profundidad se procedieron a modelar el ciclo Rankine básico con Python. Esta función debía ser capaz de recibir ciertos datos de entrada como el fluido con el que va a trabajar el ciclo, la temperatura de la fuente de calor, la temperatura del sumidero y las eficiencias de la turbina y el compresor.

Figura 14. Función de el modelo del ciclo Rankine.



En cuanto a la simpleza del modelo se pudo incurrir en imprecisiones al no considerar más variables que entran en juego en una situación real, para este modelo en cuanto a pérdidas únicamente se consideraron las ineficiencias isentrópicas de la turbina y el compresor.

Esta función del ciclo Rankine de salida brinda cada una de las propiedades termo-

---

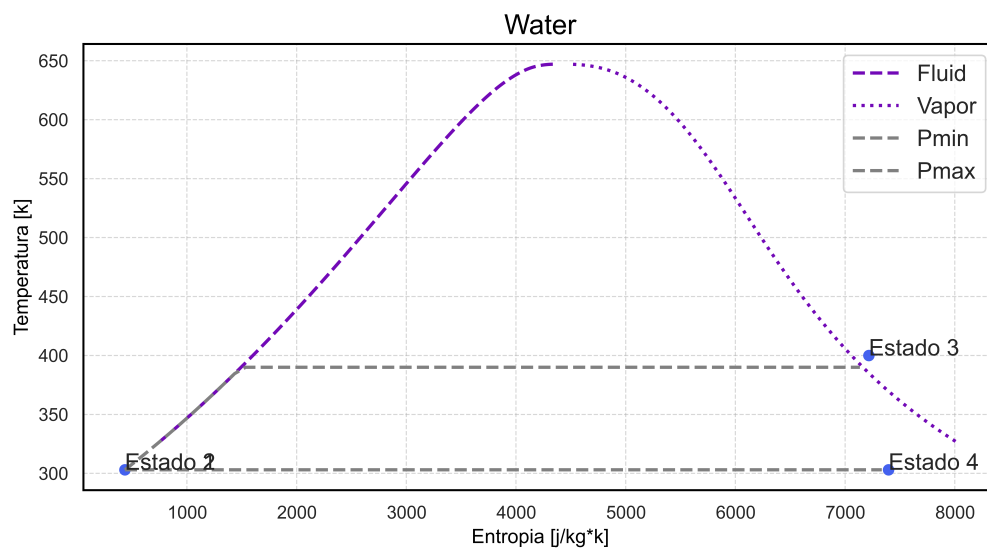
<sup>11</sup> *Mapa preliminar de gradientes geotérmicos colombianos.*

dinámicas de todos los estados del ciclo, las eficiencias basadas en la primera ley, la segunda ley y el trabajo neto producido.

Figura 15. Estados a la salida de la función Rankine.

	T[K]	P[pa]	u[j/kg]	h[j/kg]	s[j/kg]	X	V[pa*s]	k[w/m^2]	Cp[j/(kg*k)]	d[kg/m3]
Estado 1	303.000000	4210.538634	1.251027e+05	1.251069e+05	434.686027	0.000000	0.000800	0.614111	4180.114228	995.651358
Estado 2	303.008542	179644.652548	1.251223e+05	1.253027e+05	434.750636	-1.000000	0.000800	0.614221	4179.634725	995.727013
Estado 3	400.000000	179644.652548	2.541696e+06	2.722633e+06	7216.695707	-1.000000	0.000013	0.027149	2108.597109	0.992859
Estado 4	303.000000	4210.538634	2.113180e+06	2.234314e+06	7395.763972	0.867926	0.000010	0.018775	1932.441738	0.034760

Figura 16. Diagrama TS.

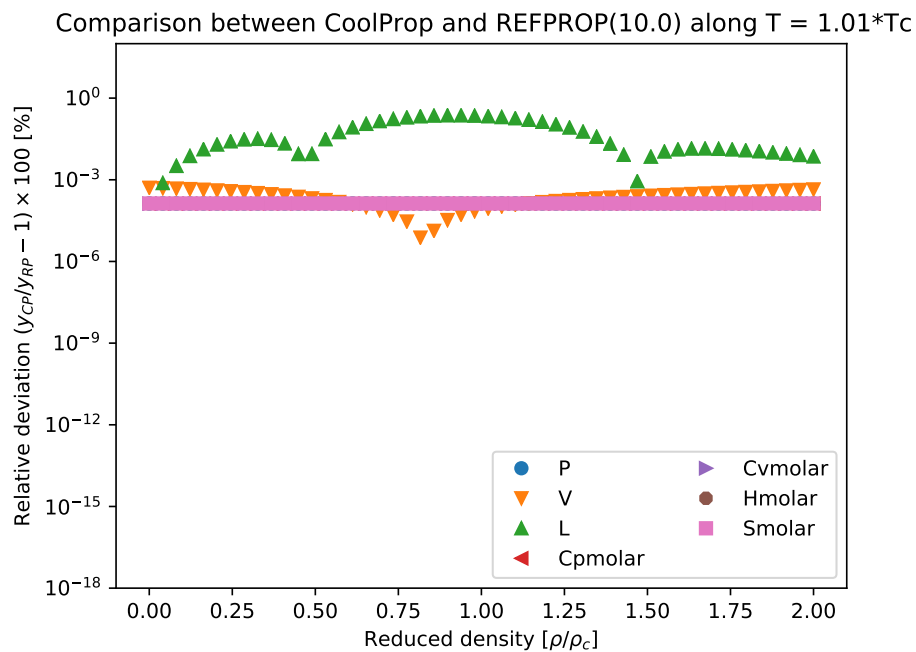


Las propiedades termodinámicas fueron calculadas con la librería de código abierto Coolprop, esta librería brinda una interfaz de alto nivel para el cálculo de las propiedades e incluye en ella una gran cantidad de fluidos usados en la ingeniería desde refrigerantes a gases nobles.

Además, se realizó la validación de cada una de las propiedades usadas con Refprop 10, Coolprop brinda la facilidad de dar los resultados en las pruebas para cada

uno de los fluidos en los que muestra una desviación menor al 1 % frente a los resultados de Refprop 10, esto brinda un respaldo a las pruebas realizadas con los diferentes fluidos seleccionados para el análisis.<sup>12</sup>

Figura 17. Validacion de propiedades



Fuente : Ian H. Bell y col. "Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp". En: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 53.6 (2014), págs. 2498-2508. DOI: 10.1021/ie4033999. eprint: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie4033999>

<sup>12</sup> Ian H. Bell y col. "Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp". En: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 53.6 (2014), págs. 2498-2508. DOI: 10.1021/ie4033999. eprint: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie4033999>.

## 4.2. Análisis Económico

Lo siguiente después de la parte termodinámica era determinar los costos de cada uno de los elementos que componían al ciclo tanto los directos como los indirectos esto con el fin de calcular cuántos miles de dólares se pagaría por KW.

Basándose en el método más común recomendado en la literatura enfocado en calcular el FCI (Fixed Capital Investment) todos los cálculos proyectados con este método se basan en el EC (equipment cost) que es el costo de cada equipo del ciclo Rankine.

Tabla 1. Variables que determinan el valor del componente

Componente	Variable
Turbina	V [m <sup>3</sup> /s]
Compresor	W [Kw]
Intercambiadores	A [m <sup>2</sup> ]

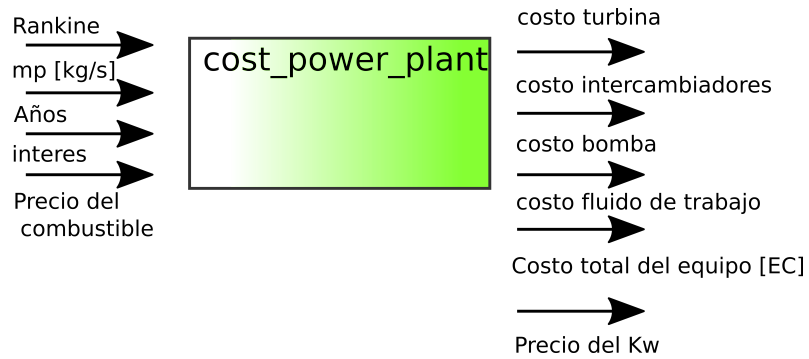
**4.2.1. Costo de los equipos** Para el cálculo del precio de los componentes del ciclo Rankine se enfocó en la turbina y los intercambiadores de calor, igualmente para el precio de la turbina se usó una ecuación que relacione una de las variables más representativas a la hora de su operación con lo es el flujo volumétrico que se ve afectado por el fluido y las propiedades termodinámicas con las que entra a la turbina en ese estado. <sup>13</sup>.

La función de **cost power plant** recibe un objeto Rankine que contenga todos los datos de las propiedades y condiciones de funcionamiento y junto con otros datos calcula el precio relacionado con la turbina ,los intercambiadores ,la bomba y el precio del combustible proyectado en función de los años a los que se le indique a

---

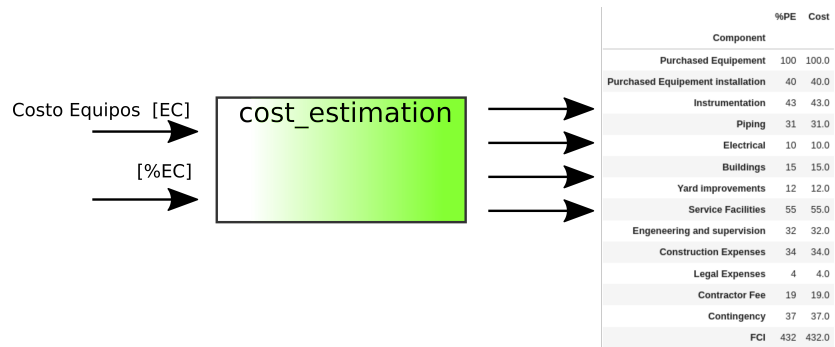
<sup>13</sup> *Design of organic rankine cycles for conversion of waste heat in a polygeneration plant.*

Figura 18. Función de costo del equipo.



un interés dado.

Figura 19. Función de costo del equipo.



La función **Cost Estimation** calcula el FCI a partir del EC calculado con la función **Cost Power Plant** todos los cálculos se hicieron basándose a los porcentajes que se le asigne a cada componente en función del %EC por ejemplo si EC vale 100 y la instalación de los equipos equivale a un 40 % de EC entonces iría sumando un 140 para el FCI. Así se calculan los costos directos como los indirectos.

Ya con estas funciones fue posible calcular el precio del KW para cada una de las cuencas del país junto con todo lo referente a dimensión y precios de los equipos.

Un ejemplo de la combinación de estas funciones es el siguiente en el que se escoge

una cuenca sedimentaria en este caso los Llanos orientales y el fluido de trabajo el Agua ,la vida útil de esta planta se proyecta a 35 años ,como Resultado de la función Rankine obtenemos la capacidad de la planta 33 MW de esta función también se calcula la eficiencia operacional, de la función relacionada con los costos podemos obtener el precio del KW para la situación, se resalta el precio de la turbina por encima de los demás costos ,para este caso el precio es de 18 millones de dólares y siguiente a esto se lista todo lo relacionado con el FCI y por último el precio total de la planta de potencia que es 86 millones de dólares.

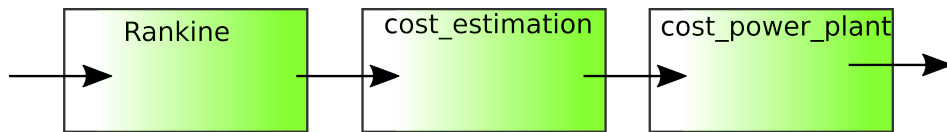
Figura 20. Resumen de una planta de potencia Rankine.

Planta de potencia Llanos Orientales		
Fluido de trabajo : Water		
Vida Util : 35 Años		
Capacidad : 33.084 Mw		
Eficiencia Operacional : 0.6495		
Costo del Kw : 2622.0 \$/Kw		
Costo de la turbina : 18.2151 mill\$		
	%PE	Cost
Component		
Purchased Equipement	100	20080643.544808
Purchased Equipement installation	40	8032257.417923
Instrumentation	43	8634676.724267
Piping	31	6224999.49889
Electrical	10	2008064.354481
Buildings	15	3012096.531721
Yard improvements	12	2409677.225377
Service Facilities	55	11044353.949644
Engeneering and supervision	32	6425805.934339
Construction Expenses	34	6827418.805235
Legal Expenses	4	803225.741792
Contractor Fee	19	3815322.273513
Contingency	37	7429838.111579
FCI	432	86748380.11357
Costo final de la planta de potencia : 86.7484 mill\$		

El proceso de cálculo es simple las funciones son dependientes de forma escalonada la función **cost power plant**. Depende de los resultados de **Cost estimation** y esta depende de los cálculos realizados por **Rankine**.

Para el ejemplo dado de los Llanos orientales la función Rankine toma los valores

Figura 21. Proceso de calculo.



relacionados por los gradientes geotérmicos dados por Ecopetrol y para las condiciones de esa región calcula todo lo relacionado con termodinámica de forma específica, Estos resultados se pasan a cost Estimation donde se calcula el valor de cada componente y por último cost power plant finaliza dando el costo total de la planta teniendo en cuenta hasta el precio del combustible proyectado en la vida útil de la planta.

Para aumentar la potencia del modelo se usó programación orientada a objetos para aprovechar todas las funciones y crear una clase llamada Rankine que pueda tener como características los parámetros de funcionamiento, los parámetros de costos, los parámetros ambientales de forma más fácil y eficaz esta última parte se usó para simulaciones más complejas.

Una vez ya se contó con todas las funciones que se iban a usar para realizar todas las pruebas con los datos de la ANH a lo largo del territorio colombiano y así compararlo con las condiciones de Paipa Boyacá.

Se procedió a hacer la selección de fluidos que iban a hacer parte de todas las pruebas en función de buscar los mejores candidatos para Paipa y el territorio colombiano. Los seleccionados fueron los siguientes listados en la tabla junto con sus características principales.

Tabla 2. Fluidos Utilizados en la simulación

Fluido	Clasificación	T Crit [°C]	P Crit[Kpa]	ODP	GWP	ASHRAE
<b>R141b</b>	Seco	204.20	4250	0.120	725	A2
<b>R134a</b>	Isoentrópico	101.60	4059	0.000	1300	A1
<b>R22</b>	Isoentrópico	96.14	4990	0.055	1760	A1
<b>R123</b>	Seco	183.68	3668	0.020	93	A1
<b>R124</b>	Seco	122.28	3624	0.022	527	A1

### 4.3. Impacto Ambiental

Para tener en cuenta el impacto ambiental que causaría la realización de uno de estos proyectos se decidió añadir un método más a la clase Rankine en la que para cada posibilidad de ciclo se calculara una calificación de impacto ambiental en función de las condiciones de operación a las que esté sometido.

Este método o esta calificación tiene en cuenta la profundidad a la que toca llegar para alcanzar determinada temperatura en función que entre más profundo se tenga que excavar a la calificación se le dará mayor importancia, esto quiere decir que entre menos profundidad menos impacto ambiental.

Las siguientes variables que se tuvieron en cuenta están relacionadas con las características del fluido usado, se puede ver en la tabla 2 que se recolectó la información relacionada con cada fluido se tuvieron en cuenta variable como la **ODP**(potencial de destrucción del ozono) ,**GWP**(potencial de calentamiento global) y la calificación de la **ASHRAE** con estos parámetros se puede saber en cierta forma que tanto impacto causa cada uno de los fluidos usados.

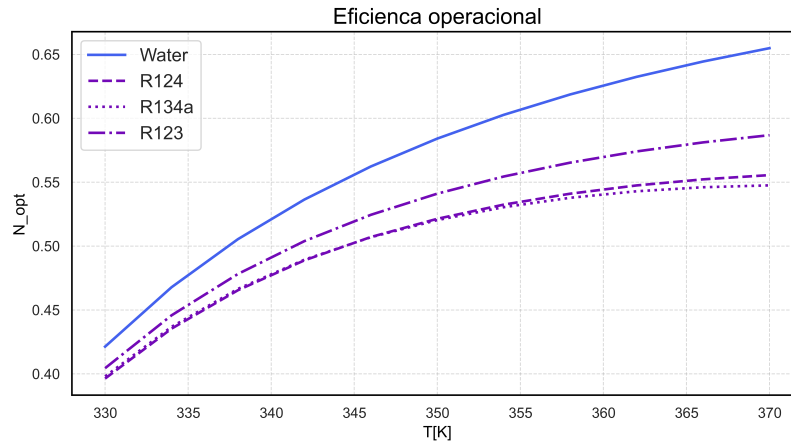
La última variable usada para el cálculo del impacto ambiental fue el flujo volumétrico a la entrada de la turbina simplemente para que brinde una noción del tamaño de los equipos usados, por ejemplo, entre más pequeño sea el volumen a la entrada

de la turbina más pequeño va a ser el equipo usado y pues de cierta forma indica que se usara menos fluido de trabajo calificando como causante de menos impacto ambiental a los proyectos que necesiten una maquinaria más pequeña.

#### 4.4. Simulaciones

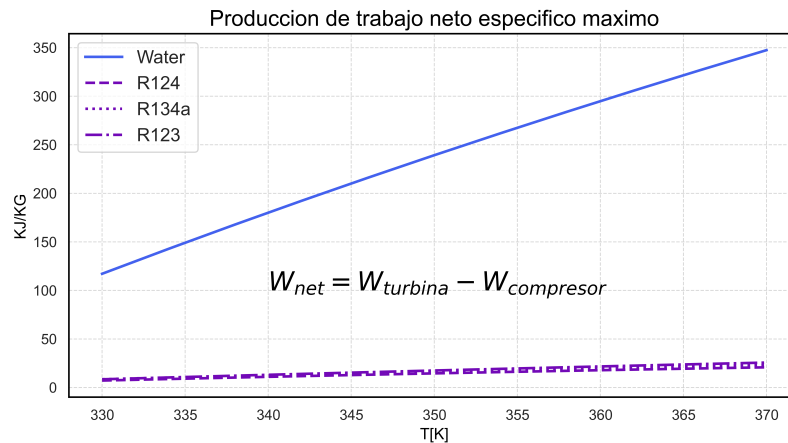
**4.4.1. Primera Simulación** Para la primera simulación se usó la función del Rankine en la que se variaba la temperatura de la fuente de calor geotérmica se dejaban las demás variables constantes y se registraba la eficiencia operacional de cada fluido en el rango de temperaturas dadas mostrando la tendencia de rendimiento de los fluidos orgánicos frente al agua.

Figura 22. Primera Simulación : Proceso de calculo.



**4.4.2. Segunda Simulación** Para la segunda simulación se usó también la función de Rankine aplicando la misma metodología que en la pasada donde se variaba la temperatura de la fuente en un rango de trabajo para los diferentes fluidos que participaban en la simulación solo que en esta la variable registrada era el trabajo neto específico de cada fluido en el rango de temperaturas.

Figura 23. Segunda Simulación : Trabajo específico.



**4.4.3. Tercera Simulación** Para la tercera simulación enfocada en la eficiencia de los fluidos utilizados comparando su comportamiento en la primera ley frente a lo máximo posible que es la eficiencia de Carnot en el rango de temperaturas de interés.

Esta tercera simulación se hizo para todos los fluidos que participaban y se obtuvo la gráfica de comportamiento para cada uno.

**4.4.4. Cuarta Simulación** Para la cuarta simulación se varió el rango de la temperatura junto con el flujo másico con el que funciona el ciclo Rankine generando una matriz en la que en un eje está el Flujo másico [Kg/s] y en el otro está la temperatura de la fuente [K] para cada una de estas posiciones de la matriz se registró el Trabajo producido y se repitió el proceso para cada uno de los fluidos.

Figura 24. Tercera simulación : Eficiencia Operacional del Agua en el rango de temperaturas de trabajo.

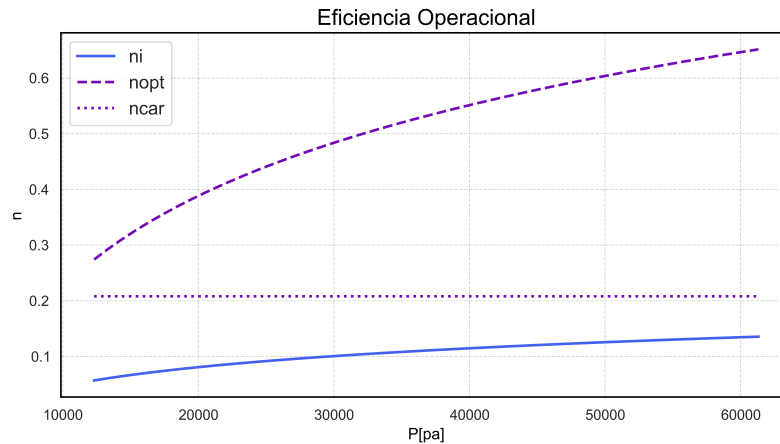
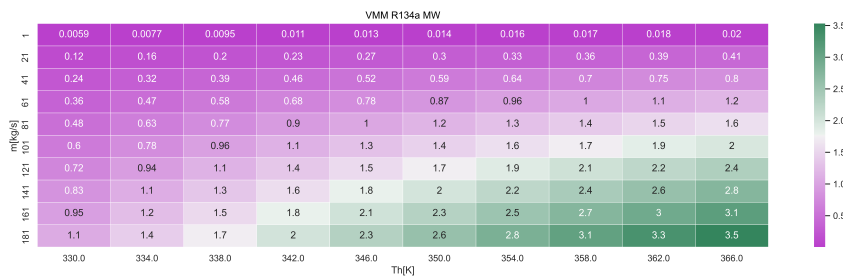


Figura 25. Matriz de rendimiento para el R134a en el Valle medio del magdalena.



**4.4.5. Quinta Simulación** Para la quinta simulación se repitió el proceso realizado en la cuarta simulación en la que se variaron el flujo másico y a la temperatura de la fuente de calor del ciclo Rankine, pero esta vez la variable registrada para la matriz de rendimiento fue el precio por Kw usando la función de Rankine junto con la de Cost Power Plant para determinar los precios para cada situación.

Las dos matrices tienen la capacidad de producir energía y el costo específico de la energía producida se generaron para cada uno de los fluidos.

Figura 26. Matriz \$/Kw R134a en el Valle Medio del Magdalena.

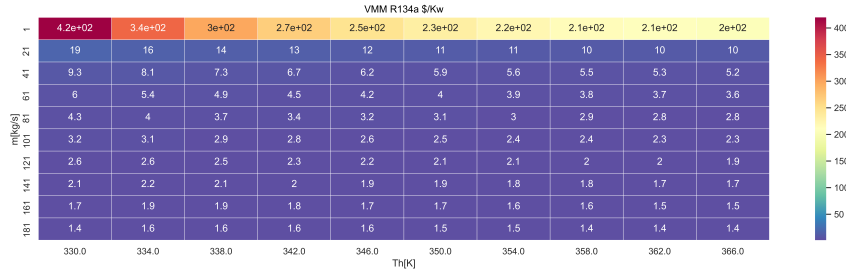
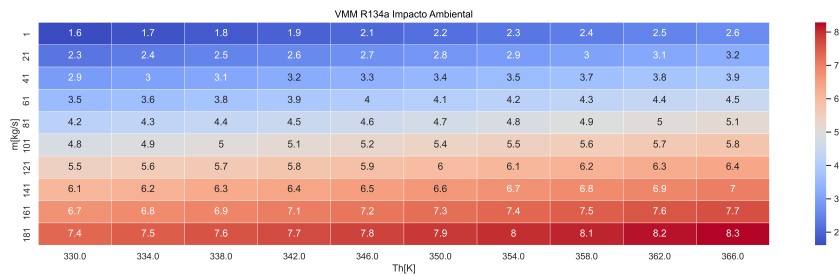


Figura 27. Impacto ambiental de el R134a en el Valle Medio del Magdalena.



Ahora se tuvo en cuenta el impacto ambiental que puede causar el fluido en cada una de las situaciones en las que se varía la temperatura en la 27 se presenta el impacto ambiental para la Cuenca del Valle medio del Magdalena ,como se repitió anterior mente este proceso de iterar todos los fluidos en cada una de las cuencas y guardando los resultados para cada uno de los fluidos en cada situación ,simplemente se capturaron esas tres variables simplemente para dar una noción del comportamiento de los fluidos bajo diferentes condiciones. Pero para cada una de estas variaciones se puede calcular cualquier característica del Rankine.

**4.4.6. Sexta Simulación** En esta ocasión aprovechando la potencia del modelo orientado a objetos se realizó la iteración de todos los fluidos en todas las cuencas variando la profundidad y el flujo másico de entrada en el Rankine, variando

la profundidad junto con los gradientes geotérmicos de cada una de las cuencas analizadas indirectamente también se variaba la temperatura de la fuente ,además al variar la profundidad de excavación se dio un poco más de noción del tamaño y el costo del proyecto cosa que no es posible mostrando únicamente la fuente de la temperatura como se hizo en simulaciones pasadas.

Esta nueva matriz a diferencia de las matrices de simulaciones pasadas almacenaba toda la información del Rankine para cada caso específico permitiendo acceder después a esta información más fácilmente además en esta no se hizo una matriz por cada fluido si no que se eligió el mejor fluido para cada una de las situaciones y es la información que se presenta en la matriz, esto permitió determinar para las condiciones de operación cuál de todos los fluidos era el mejor.

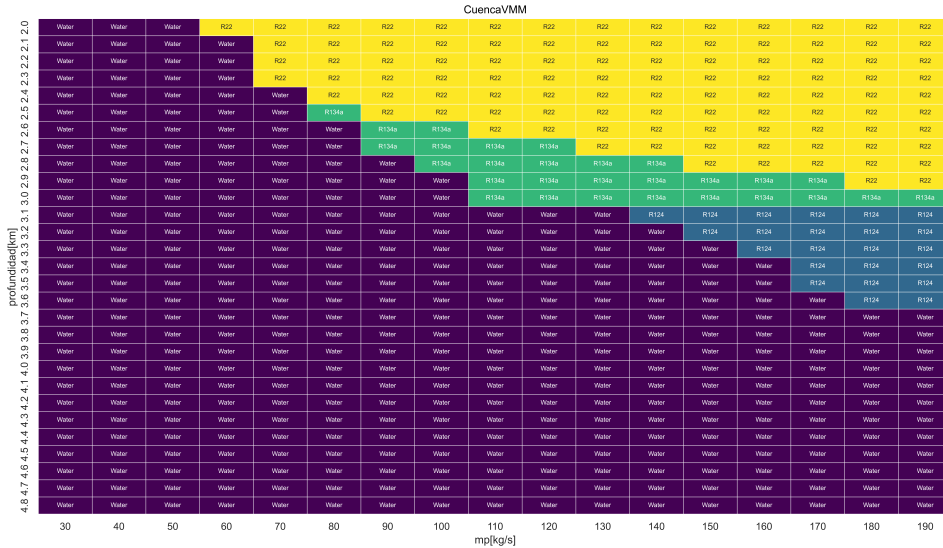
Se usó como factor de decisión el precio del Kw para cada una de las situaciones eso quiere decir que a lo largo de la matriz y en todas sus variaciones esta únicamente el mejor fluido para esa situación en función del precio del Kw.

Como podemos observar en 28 la matriz se presenta en diferentes colores cada uno de ellos corresponde a un fluido y la ubicación del fluido en la matriz indica que es el mejor fluido para la situación en la que se presenta ,mostrando que al variar las condiciones ,cambian de prioridad los fluidos presentados esta matriz se organizó con el precio del KW.

Para la siguiente matriz se realizó el mismo proceso que en la pasada, pero esta vez se cambió el parámetro de selección, para cada situación ya no se seleccionaba en función del precio del KW si no en función del costo total de la planta y todo lo relacionado con los costos.

Con estos parámetros de selección que se pueden observar en 29 la configuración de colores cambio a lo presentado en la anterior simulación dando como nuevos

Figura 28. Impacto ambiental Agua en el Valle Medio del Magdalena.



mejores en función del parámetro de selección que es el costo total.

Se pudieron haber generado más matrices de selección en función de uno o más parámetros de selección, pero debido a limitaciones computacionales se dejó ahí con estas las que más resaltan de todas las posibilidades.

Para estas matrices basadas en selección únicamente no se mostró el mejor fluido para cada situación sino también se crearon matrices que muestran el precio por KW, el costo total y el impacto ambiental como se puede ver en 30 en donde para la matriz mostrada en 29 para el parámetro de selección del costo para cada uno de los posibles proyectos se muestra el impacto ambiental que podrían causar según la función de calificación de impacto ambiental creada. Este proceso se repitió para cada una de las cuencas sedimentarias.

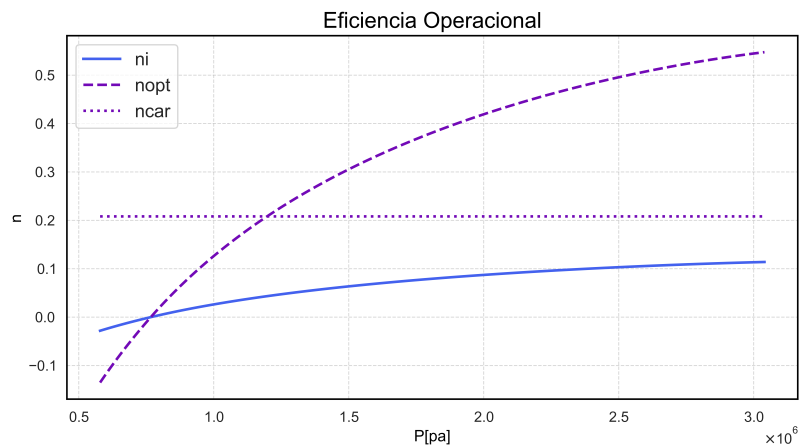


## 5. Análisis de Resultados

### 5.1. Simulación 1

En la figura 22 donde se varía la temperatura de la fuente con la intención de determinar la variación de la eficiencia operacional en todo el rango de temperaturas, queda en evidencia un mayor desempeño del agua frente a los fluidos evaluados. Este fluido húmedo presenta un mayor desempeño que los fluidos orgánicos evaluados, en los fluidos orgánicos el que presentó un mejor desempeño en todo el rango de temperaturas fue el R124. Se nota un rango de operación de los fluidos orgánicos en el que la mayor eficiencia operacional lograda es de casi 0.6.

Figura 31. Eficiencia operacional R134a.



A pesar de que el agua obtuvo una mejor eficiencia operacional que los fluidos orgánicos, la eficiencia máxima por la primera ley alcanzada por el agua ronda el 12% como se puede ver en la figura 24 y en los fluidos orgánicos más o menos es de 10% representado una diferencia que no es tan evidente como en la gráfica de eficiencia operacional.

## **5.2. Simulación 2**

En la figura 23 se compara el comportamiento de los fluidos orgánicos frente al agua a la hora de su capacidad de producir trabajo dejando en evidencia una gran diferencia entre los orgánicos y el agua. El agua dando como resultado una gran capacidad de producir energía por kg de masa en el rango de temperatura evaluada. El agua presenta un mejor rendimiento en casi más de 100 veces de lo que se puede lograr por Kg en cualquier Fluido orgánico.

En teoría esto debería representar una gran ventaja del agua frente a los fluidos orgánicos y solo guiándose de esta gráfica cualquiera diría que no hay razón para usar este tipo de fluidos bajo ninguna circunstancia. Pero pruebas realizadas demuestran que hay determinadas condiciones para las que el uso de fluidos orgánicos es mucho mejor que el uso del agua.

## **5.3. Matrices de desempeño de los fluidos orgánicos**

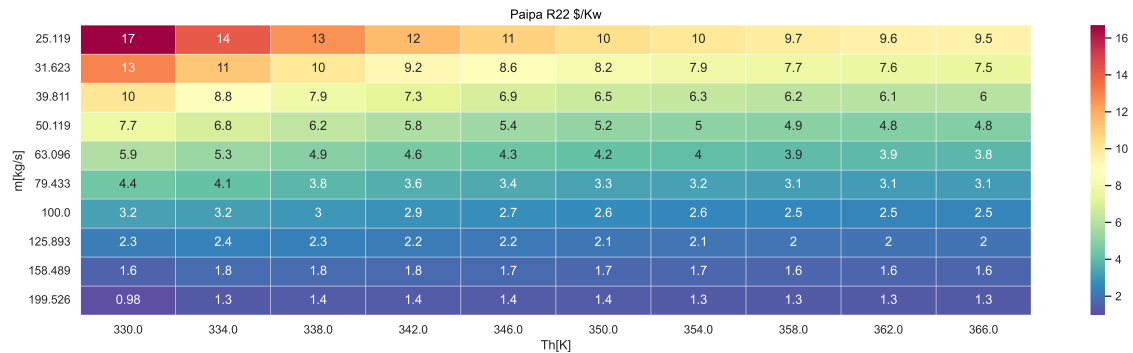
Para las condiciones geotérmicas de Paipa Boyacá los resultados de las matrices de desempeño de los fluidos orgánicos.

**5.3.1. Cuarta Simulación** Como se explicó anteriormente en la metodología para la cuarta simulación se realizaron pruebas para cada uno de los fluidos en todas las cuencas sedimentarias del país poniendo especial enfoque en el precio por Kw, los mega watts generados y el impacto ambiental.

Como resultado arrojo las características de funcionamiento de los fluidos examinados específicamente para Paipa Boyacá, aunque a manera de comparación esta

prueba se realizó en cada una de las cuencas del país arrojando más de 480 matrices de rendimiento en total para la simulación.

Figura 32. Matriz de desempeño R22 Paipa Boyaca \$/Kw.



En la 32 podemos observar el comportamiento del refrigerante R22 para las condiciones de Paipa ,en esta matriz la variable de enfoque es el precio del Kw por miles de dólares ,en ella se evidencia una región de trabajo óptima en función de la variable de interés dejando como peores lugares de rendimiento en los que se usa un bajo flujo másico y una baja temperatura de la fuente un resultado evidente ,se podría decir que está directamente ligado a la calidad del proyecto entre más potencia térmico se tenga y mayor flujo de masa el precio del Kw se abarata. Esta matriz brinda de forma didáctica el rango de funcionamiento adecuado para el R22 si se decidiera a usar como fluido de trabajo en algún proyecto basándose en el precio del KW.

Los demás fluidos orgánicos presentaron un menor rendimiento que el R22 en el rango de operación presentado las variaciones no son muy grandes apenas de cientos de dólares por Kw en todo el rango de funcionamiento.

En la matriz se puede observar un rango de precios desde los 17 mil \$/KW hasta 1.3 \$/Kw en la literatura encontrada los precios de la energía geotérmica 33 varían

Figura 33. Costos de la energía \$/Kw reportados en la literatura en función de la tecnología de producción.

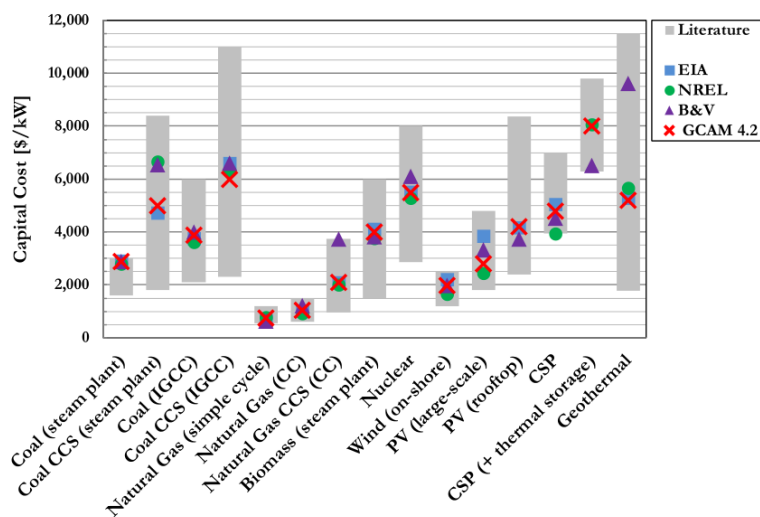


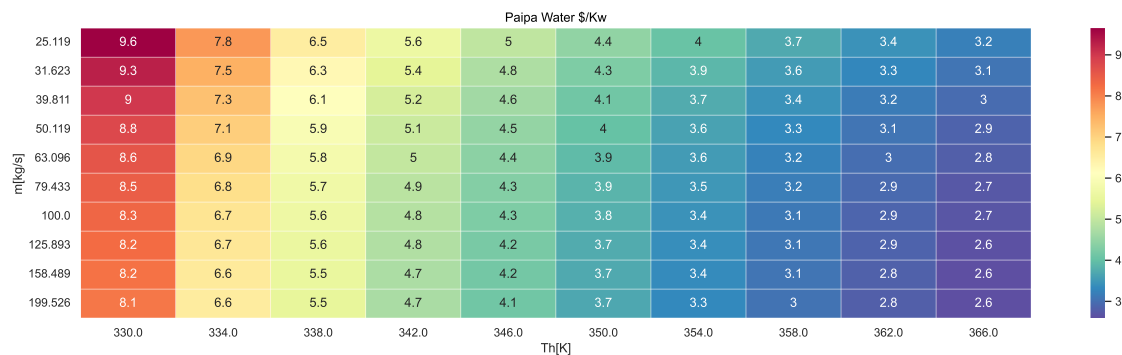
Figure 4. Comparison of current (2015) capital cost estimates for a set of electricity-generating technologies reported in the open literature. Costs are expressed in 2010 USD per kW. Main sources: EIA: [51]; NREL: [50]; B&V: [35].

Fuente : Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)

desde los 2000 dólares hasta casi los 12 mil se puede decir que debido al modelo de cálculo térmico usado se puede incurrir en una imprecisión debido a que no se consideran muchas variables ,pero el modelo brinda una visión aproximada de lo que se podría lograr con determinados proyectos y lo que se necesitaría para lograrlo.

Se podría decir viendo 32 que el rango de operación óptimo para este fluido orgánico está por encima de los 50 kg/s de flujo másico de trabajo desde este punto el precio del Kw varía de 3.9 a 1.3 miles de \$/Kw y ocurre de manera similar en los demás fluidos orgánicos analizados.

Figura 34. Matriz de desempeño Water Paipa Boyaca \$/Kw.

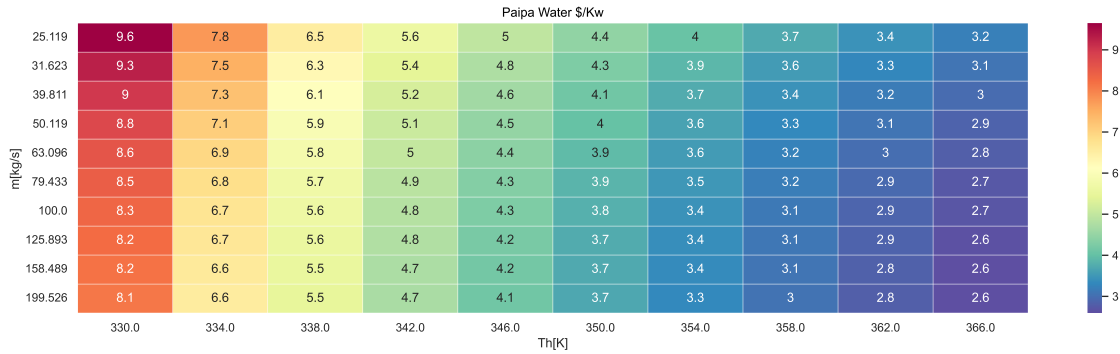


Comparado con el agua esta si presenta una variación significativa en función del el flujo másico y la temperatura de la fuente ,diferente a los orgánicos que presentaban muy buen desempeño en todo el rango de temperaturas analizado 35 se puede ver que el rango de funcionamiento óptimo del agua está por encima de los 50 Kg/s y los 350 grados K y sus precios son de casi el doble para las mismas condiciones que los fluidos orgánicos, anteriormente se había dicho que viendo el agua desde su capacidad especifica de producir trabajo no había razón alguna para elegir a los fluidos orgánicos por encima del agua pero en esta matriz queda en evidencia que los precios por Kw que hay que pagar por el agua son mucho más altos que en los fluidos orgánicos, pero al igual que en la suposición pasada hay que tener en

cuenta más variables para determinar cuál es el mejor proyecto para determinadas condiciones.

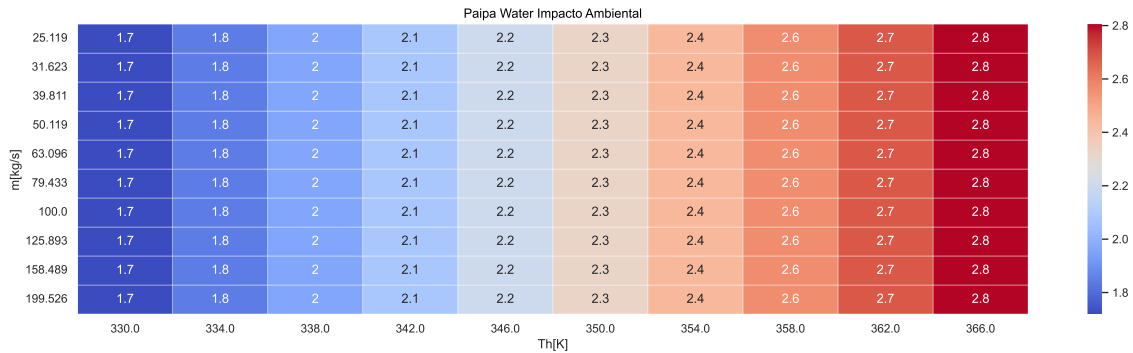
En el rango de funcionamiento de los fluidos orgánicos también se analizó el impac-

Figura 35. Matriz de desempeño Water Paipa Boyaca \$/Kw.



to ambiental que se podría causar como ya se había explicado en la metodología esta calificación que tenía en cuenta.

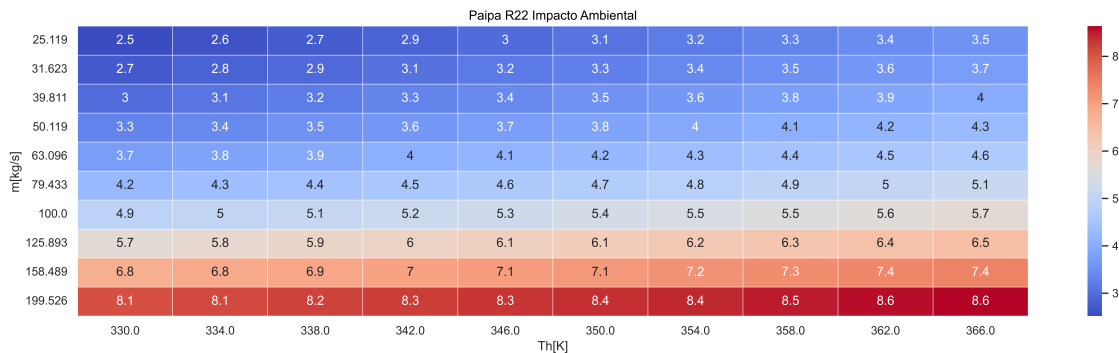
Figura 36. Matriz de desempeño Water Paipa Boyaca Impacto Ambiental.



Desde el punto de vista ambiental el fluido que menos causa impacto es el agua como se puede evidenciar en 36 esto es evidente porque el agua no genera partículas que destruyan la capa de ozono o similares a diferencia de los fluidos orgánicos que la utilización de estos ya implica un mayor impacto ambiental que es grande com-

parado con el agua ,el R22 que resaltaba en las matrices de precio por Kw en los resultados de impacto ambiental también resalto , pero de manera negativa siendo entre los fluidos orgánicos el que más impacto ambiental genera.

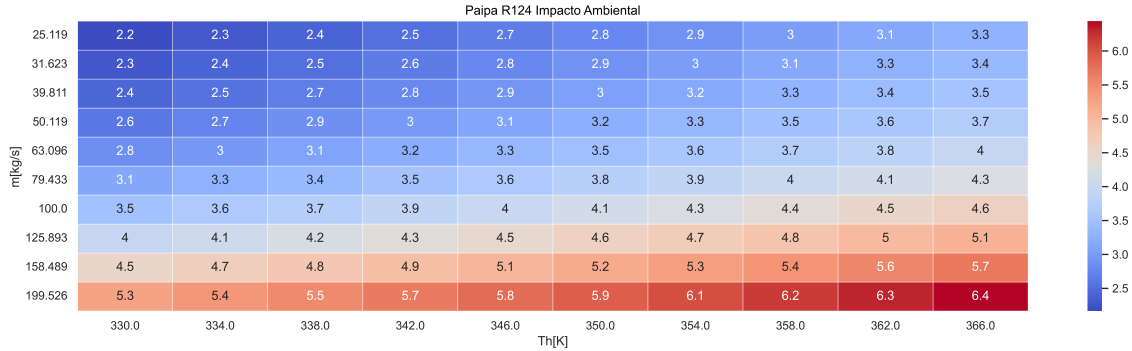
Figura 37. Matriz de desempeño R22 Paipa Boyaca Impacto Ambiental.



Esta debe ser una variable importante a tener en cuenta a la hora de decidir cuál es el mejor fluido de trabajo. Comparadas 37 y 36 se puede ver el mejor y el peor escenario en cuanto a contaminación causada mientras que en la matriz del agua el impacto ambiental varía desde una calificación de 1.7 hasta un máximo de 2.8 en la matriz del R22 esta calificación varía desde 2.5 hasta 8.6 superando en todo el rango de funcionamiento a el agua en cuanto a contaminación se refiere. Si se va a realizar un proyecto de aprovechamiento de energía con un enfoque de amigable con el medio ambiente la utilización del refrigerante R22 debe ser evitada.

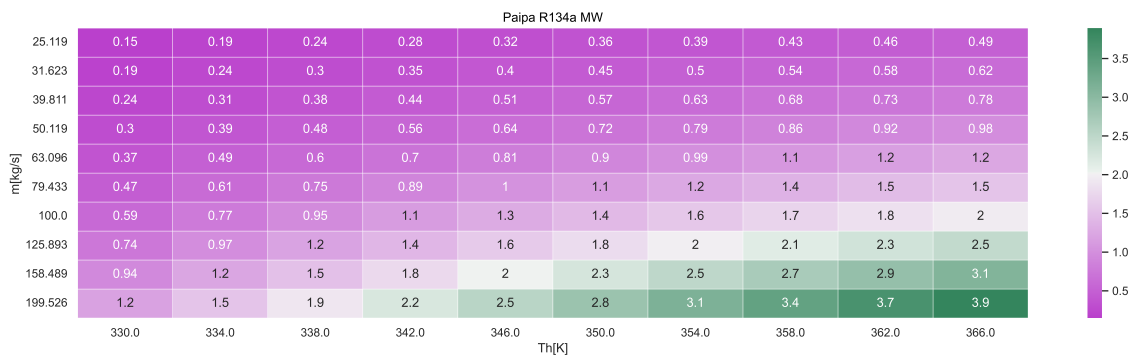
Entre los fluidos orgánicos el fluido con una mejor matriz de desempeño desde el punto de vista de impacto ambiental en los fluidos orgánicos analizados fue el R124 en el que las calificaciones varían desde 2.2 hasta 6.4 como se puede evidenciar en 38 aun así comparado con el agua es mucho peor en cuanto impacto ambiental se refiere llegando a superarla casi en tres veces.

Figura 38. Matriz de desempeño R124 Paipa Boyaca Impacto Ambiental.



En simulaciones anteriores se habló de la capacidad específica de producir trabajo y como los fluidos orgánicos eran amplia mente superados por el agua, pero con ayuda de factores de decisión como el precio del KW se puede llegar a la conclusión de que en determinadas condiciones es mejor la utilización de fluidos orgánicos, pero aquí viene una de las grandes limitaciones de este tipo de fluidos que ya era evidente en simulaciones pasadas, y es la capacidad de producir energía por Kg.

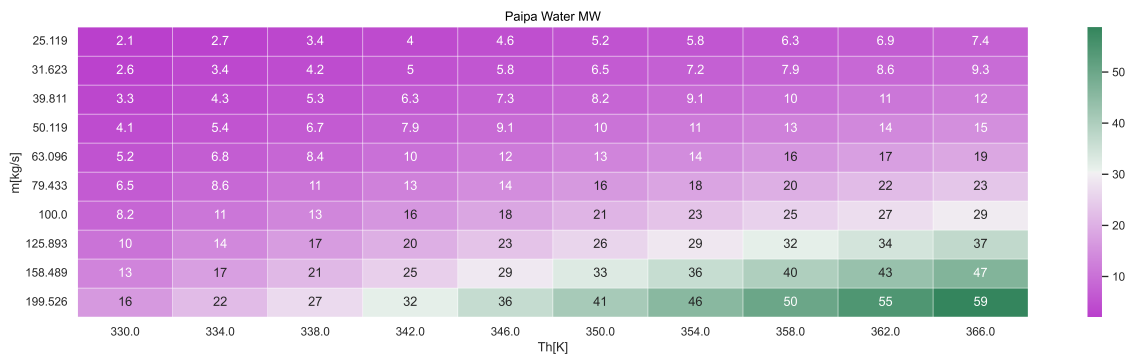
Figura 39. Matriz de desempeño R134a Paipa Boyaca Mega Watts producidos.



Como se puede evidenciar en 39 se presenta la matriz de desempeño del refrigerante R134a para Paipa Boyacá en ella se evidencia un rango desde 150 Kw hasta 3.9 Mw en las mejores condiciones ,esto comparado con la matriz de producción de

mega Watts del agua puede ser insignificante ,el agua con un potencial de producción energética de casi 100 veces más que los fluidos orgánicos lo supera ampliamente ,esto condiciona la utilización de fluidos orgánicos en ocasiones en las que no se necesite generar energía en grandes cantidades de mega Watts.

Figura 40. Matriz de desempeño del Agua en Paipa Boyacá Mega Watts producidos.



Los resultados de la matriz de desempeño en cuanto producción de mega watts se pueden evidenciar en 40 en ella se pueden ver un rango de producción desde 2 a 60 Mw superando ampliamente al mejor fluido orgánico en cuanto a producción específica de energía.

Con estas tres variaciones de la matriz de desempeño de cada fluido podemos ir dándonos cuenta de ciertas características y rangos de operación de cada uno, si quisiéramos una gran capacidad de producción energética los fluidos orgánicos quedan resegados a un segundo lugar ,pero si se insiste en estos desde el este punto de vista el mejor fluido orgánico sería el R134a. Pero si se decidiera elegir al fluido que presente mejor relación entre el precio del Kw por miles de dólares el R22 sería la mejor opción de todas esto solo teniendo en cuenta una variable ,si por ejemplo se tomara como característica se seleccionó el precio del Kw como se

dijo anteriormente sería el R22 , pero teniendo en cuenta el impacto ambiental que puede causar este fluido que es el más contaminante de todos los usados pagando unos cuantos cientos de dólares por Kw sería una mejor elección el R124 que de los fluidos orgánicos es el que menos contamina y simplemente se tendría que hacer una inversión un poco mayor. Todo dependerá de las variables de elección que se tengan para cada caso en particular y que valor se le dé a cada una de ellas.

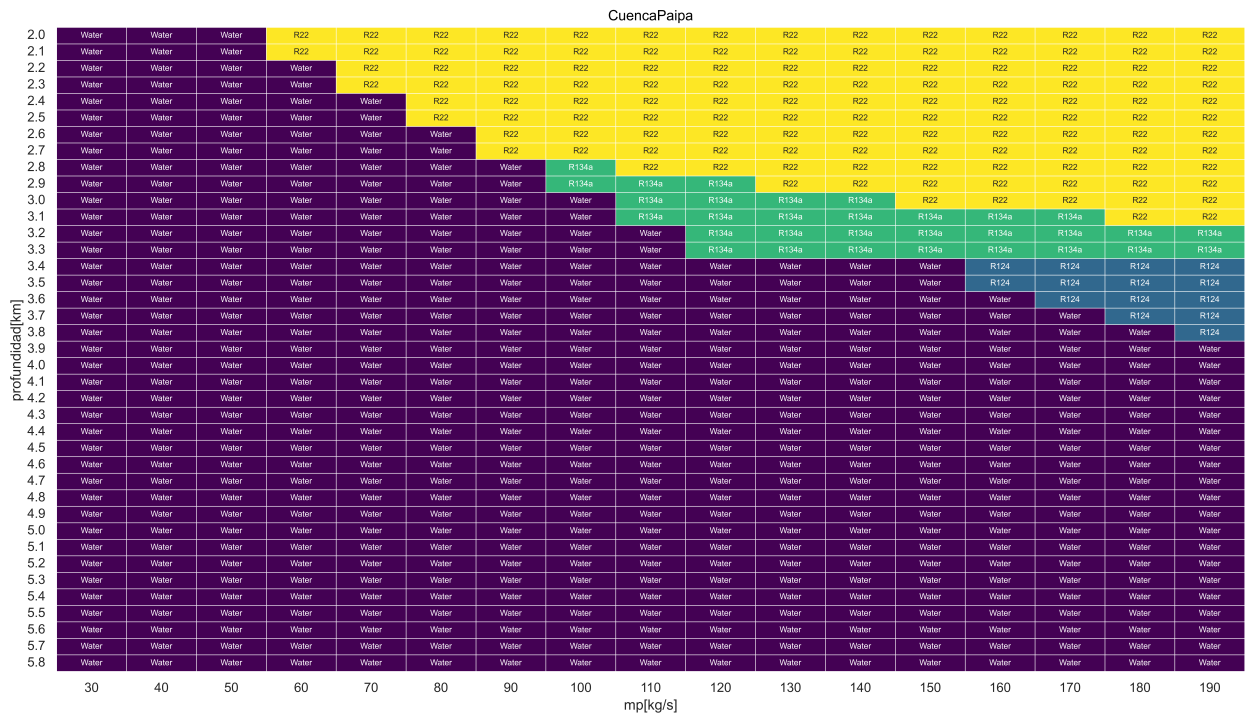
Este problema de optimización en función de múltiples variables para casos específicos es difícil de abordar viendo matriz por matriz de cada uno de los fluidos y esté ligado a la capacidad de decisión del observador, basándose en este problema fue que se decidió hacer la sexta simulación que da como resultado el mejor fluido para cada situación específica comparando para cada caso en función de un parámetro de selección cual es el mejor fluido.

**5.3.2. Sexta Simulación** Los resultados arrojados por esta simulación son definitivos y mucho más útiles que los presentados por las matrices anteriores en que se presentaban las variables de interés individualmente de cada fluido ,en este caso para la matriz de selección de mejor fluido para cada una de las condiciones de gradientes geotérmicos de cada una de las cuencas para cada variación presenta el mejor fluido que se puede usar en función de un parámetro de selección por ejemplo el precio del KW ,con este parámetro se comparó cada una de las situaciones y se eligió el mejor fluido para estos casos llenando la casilla indicada.

En función del parámetro de selección se pueden ver otras variables de los mejores proyectos como por ejemplo el impacto ambiental que causaría el mejor proyecto por precio del KW en determinadas condiciones de operación. Como se puede evidenciar ahora las variables que se pueden tener en cuenta son muchas más ,pero esto sigue sujeto a limitaciones debido al requerimiento computacional que repre-

sentaba agregar una sola condición de selección más a la matriz se dejó únicamente en este nivel de complejidad pero con una mayor potencia computacional se podría seleccionar el mejor fluido basándose en los requerimientos específicos para determinado individuo o situación o basándose en qué importancia le da a cada una de las variables de interés en estas situaciones.

Figura 41. Matriz de seccion Paipa Boyacá.



En la matriz de selección 41 se puede ver la matriz de selección en función del precio del KW en Paipa Boyacá viendo que el agua de color morado ocupa gran parte de la matriz a pesar de que en las matrices de desempeño de los fluidos se había visto que en la mayoría de rangos los fluidos orgánicos era más costoso usar agua ,pero cuando él había muy poco flujo másico y temperatura de la fuente baja

los precios de los fluidos orgánicos superaban a los precios de la matriz de agua ,además se puede observar que a mayor profundidad mayor va a ser la temperatura de la fuente y los fluidos orgánicos tienen una limitación que su temperatura crítica es mucho menor que la del agua.

En la parte superior de la matriz los fluidos orgánicos toman el protagonismo desde un flujo de masa mayor a 50 kg/s y a una profundidad menor de 4 km la mayoría de fluidos presentes son los orgánicos en la parte de menor profundidad se encuentra el R22 que es el fluido más contaminante de todos los analizados como se pudo evidenciar en simulaciones pasadas el R134a le sigue en el nivel de profundidad en un rango desde 2.8 km hasta 3.6 km de profundidad este es el fluido orgánico que mejor se desempeña por último a mayor profundidad está el R124.

Para esta misma matriz podemos ver el impacto ambiental que puede causar cada uno de estos proyectos en la matriz 42 se puede ver la calificación de impacto ambiental del mejor proyecto en función del precio del Kw, se puede observar que el impacto ambiental causado por el agua de color morado está directamente relacionado con la profundidad. En cuanto a los fluidos orgánicos se puede evidenciar que el R22 de color amarillo apear de trabajar en bajas profundidades es uno de los que más contamina ,dando indicaciones que si uno de los factores fuera causar bajo impacto ambiental este fluido sería descartado por completo y fácilmente remplazado por el R124 o el R134a que en un costo mayor contaminan menos ,eso si la diferencia entre contaminación que causa cada uno de estos fluidos es pequeña así que tal vez no sea tan determinante ,de los fluido orgánicos el R122 es el que presenta mejor desempeño ambiental mente y si el impacto ambiental fuera una variable de selección en una matriz de múltiple selección sin duda este ocuparía todo el rango de operación de los fluidos orgánicos.

Figura 42. Matriz de seccion Paipa Boyacá impacto ambiental.

Cuenca Paipa Imapacto Ambiental

2.0	2.0	2.0	3.97	4.18	4.49	4.8	5.11	5.42	5.73	6.05	6.36	6.67	6.98	7.29	7.6	7.91
2.1	2.1	2.1	3.95	4.26	4.57	4.88	5.19	5.5	5.8	6.11	6.42	6.73	7.04	7.35	7.66	7.97
2.2	2.2	2.2	2.2	4.34	4.65	4.96	5.26	5.57	5.87	6.18	6.49	6.79	7.1	7.4	7.71	8.02
2.3	2.3	2.3	2.3	4.43	4.73	5.03	5.34	5.64	5.95	6.25	6.55	6.86	7.16	7.46	7.77	8.07
2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	4.81	5.12	5.42	5.72	6.02	6.32	6.62	6.93	7.23	7.53	7.83	8.13
2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	4.9	5.2	5.5	5.8	6.1	6.4	6.7	6.99	7.29	7.59	7.89	8.19
2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8

110  
mp[kg/s]

Ahora si quisiéramos ver el mejor precio por KW que se podría conseguir en Paipa Boyacá para las condiciones mostradas en la 43 podemos ver los precios por Kw para cada caso este precio cabe recordar que son los mejores para la situación mostrada. Se observó una particularidad el agua tiene un rango de precios que van desde los 6 mil \$/kw hasta los 1 mil \$/Kw unos precios menores que los se pueden ver en los fluidos orgánicos que van desde 5 mil \$/Kw hasta 1.38 mil \$/kw contradiciendo suposiciones pasadas en las que basándose en el precio del Kw los fluidos Orgánicos eran mejores pero como se puede evidenciar se pueden lograr precios muy bajos con fluidos con el agua eso si no en las mismas condiciones ,como todo hay muchas variables que afectan el desempeño de los fluidos en la matriz ,partien-

Figura 43. Matriz de selección Paipa Boyacá miles de dolares por Kw.

		Cuenca Paipa \$/Kw																
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
2.0	6.91	5.77	5.63	5.63	4.29	3.73	3.3	2.85	2.67	2.43	2.23	2.06	1.91	1.78	1.66	1.56	1.47	
2.1	5.34	5.13	5.0	4.76	4.07	3.56	3.15	2.83	2.57	2.35	2.16	2.0	1.87	1.75	1.64	1.55	1.46	
2.2	4.62	4.62	4.5	4.42	3.9	3.42	3.04	2.73	2.49	2.28	2.1	1.95	1.82	1.71	1.61	1.52	1.44	
2.3	4.39	4.21	4.1	4.02	3.77	3.31	2.94	2.65	2.42	2.22	2.05	1.91	1.79	1.68	1.58	1.5	1.42	
2.4	4.04	3.87	3.76	3.69	3.64	3.22	2.87	2.59	2.36	2.17	2.01	1.87	1.75	1.65	1.56	1.47	1.4	
2.5	3.75	3.59	3.49	3.42	3.37	3.16	2.82	2.54	2.32	2.14	1.98	1.85	1.73	1.63	1.54	1.46	1.39	
2.6	3.51	3.35	3.25	3.19	3.14	3.11	2.78	2.51	2.29	2.11	1.96	1.82	1.71	1.61	1.52	1.44	1.37	
2.7	3.29	3.14	3.05	2.99	2.94	2.91	2.75	2.49	2.27	2.09	1.94	1.81	1.7	1.6	1.51	1.43	1.37	
2.8	3.11	2.96	2.87	2.81	2.77	2.74	2.71	2.47	2.26	2.08	1.93	1.8	1.69	1.59	1.51	1.43	1.36	
2.9	2.95	2.8	2.72	2.66	2.62	2.59	2.56	2.44	2.24	2.06	1.93	1.8	1.69	1.59	1.51	1.43	1.36	
3.0	2.81	2.67	2.58	2.52	2.48	2.45	2.43	2.41	2.23	2.06	1.92	1.8	1.69	1.59	1.51	1.44	1.37	
3.1	2.68	2.54	2.46	2.4	2.37	2.34	2.31	2.29	2.22	2.06	1.92	1.8	1.69	1.6	1.52	1.45	1.38	
3.2	2.57	2.43	2.35	2.3	2.26	2.23	2.21	2.19	2.18	2.06	1.92	1.8	1.69	1.6	1.52	1.45	1.39	
3.3	2.47	2.33	2.25	2.2	2.16	2.14	2.11	2.1	2.08	2.06	1.92	1.8	1.7	1.61	1.53	1.46	1.39	
3.4	2.37	2.24	2.17	2.11	2.08	2.05	2.03	2.01	2.0	1.98	1.97	1.97	1.96	1.88	1.8	1.72	1.65	
3.5	2.29	2.16	2.09	2.04	2.0	1.97	1.95	1.93	1.92	1.91	1.9	1.89	1.88	1.87	1.78	1.71	1.64	
3.6	2.22	2.09	2.01	1.96	1.93	1.9	1.88	1.86	1.85	1.84	1.83	1.82	1.81	1.8	1.77	1.7	1.63	
3.7	2.15	2.02	1.95	1.9	1.86	1.83	1.81	1.8	1.78	1.77	1.76	1.75	1.75	1.74	1.74	1.69	1.62	
3.8	2.08	1.96	1.89	1.84	1.8	1.77	1.75	1.74	1.72	1.71	1.7	1.69	1.69	1.68	1.68	1.67	1.62	
3.9	2.03	1.9	1.83	1.78	1.75	1.72	1.7	1.68	1.67	1.66	1.65	1.64	1.63	1.63	1.62	1.62	1.61	
4.0	1.97	1.85	1.78	1.73	1.69	1.67	1.65	1.63	1.62	1.61	1.6	1.59	1.58	1.58	1.57	1.57	1.56	
4.1	1.92	1.8	1.73	1.68	1.65	1.62	1.6	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.54	1.53	1.52	1.52	1.52	
4.2	1.88	1.76	1.68	1.64	1.6	1.58	1.56	1.54	1.53	1.52	1.51	1.5	1.49	1.49	1.48	1.48	1.47	
4.3	1.83	1.71	1.64	1.6	1.56	1.54	1.52	1.5	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.45	1.44	1.44	1.43	
4.4	1.79	1.68	1.6	1.56	1.52	1.5	1.48	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.4	1.4	1.39	
4.5	1.76	1.64	1.57	1.52	1.49	1.46	1.44	1.43	1.41	1.4	1.39	1.38	1.38	1.37	1.37	1.36	1.36	
4.6	1.72	1.61	1.53	1.49	1.45	1.43	1.41	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.35	1.34	1.33	1.33	1.33	
4.7	1.69	1.57	1.5	1.46	1.42	1.4	1.38	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.31	1.3	1.3	1.29	
4.8	1.66	1.54	1.47	1.43	1.39	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.3	1.29	1.29	1.28	1.27	1.27	1.27	
4.9	1.63	1.51	1.44	1.4	1.36	1.34	1.32	1.3	1.29	1.28	1.27	1.26	1.26	1.25	1.25	1.24	1.24	
5.0	1.61	1.49	1.42	1.37	1.34	1.31	1.29	1.28	1.27	1.26	1.25	1.24	1.23	1.23	1.22	1.22	1.21	
5.1	1.58	1.46	1.39	1.35	1.31	1.29	1.27	1.25	1.24	1.23	1.22	1.21	1.21	1.2	1.2	1.19	1.19	
5.2	1.56	1.44	1.37	1.32	1.29	1.26	1.25	1.23	1.22	1.21	1.2	1.18	1.18	1.18	1.18	1.17	1.16	
5.3	1.53	1.42	1.35	1.3	1.27	1.24	1.22	1.21	1.2	1.19	1.18	1.16	1.16	1.16	1.15	1.15	1.14	
5.4	1.51	1.4	1.33	1.28	1.25	1.22	1.2	1.19	1.17	1.16	1.15	1.15	1.14	1.13	1.13	1.12	1.12	
5.5	1.49	1.38	1.31	1.26	1.23	1.2	1.18	1.17	1.15	1.14	1.13	1.13	1.12	1.11	1.11	1.1	1.1	
5.6	1.47	1.36	1.29	1.24	1.21	1.18	1.16	1.15	1.14	1.12	1.12	1.11	1.1	1.1	1.09	1.08	1.08	
5.7	1.46	1.34	1.27	1.22	1.19	1.17	1.15	1.13	1.12	1.11	1.1	1.09	1.08	1.08	1.07	1.07	1.06	
5.8	1.44	1.32	1.25	1.21	1.17	1.15	1.13	1.11	1.1	1.09	1.08	1.07	1.07	1.06	1.06	1.05	1.05	

do de esto se encontró otra variable que entra en juego a la hora de la realización de un proyecto de esto y es el presupuesto.

El presupuesto es la otra variable que entra en juego y se puede ver en 44 cuanto se tendría que pagar para lograr esos precios por KW con los que se realizó la selección del mejor fluido ,partiendo de esto se puede clasificar que los fluidos orgánicos son proyectos pequeños de bajo presupuesto mientras que un proyecto con fluido de trabajo como el agua se necesita contar con una gran capital de inversión ,esto es fundamental a la hora de la selección anterior mente se decía que el agua tenia mejores precios pro KW llegando a los miles dólares por KW pero a la hora de la realización de un proyecto como este en el que se quiere lograr los mil dólares por

Figura 44. Matriz de selección Paipa Boyacá Costo Total.

		Cuenca Paipa Costo total																	
profundidad[km]		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	
2.0	25.56	32.14	39.91	3.02	3.0	2.98	2.97	2.95	2.93	2.91	2.9	2.88	2.86	2.84	2.83	2.81	2.79		
2.1	25.99	33.25	40.51	3.23	3.22	3.21	3.21	3.2	3.19	3.19	3.18	3.17	3.16	3.16	3.15	3.14	3.14		
2.2	26.31	33.63	40.95	48.28	3.42	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43		
2.3	26.57	33.93	41.29	48.65	3.62	3.63	3.63	3.64	3.64	3.65	3.66	3.66	3.67	3.68	3.68	3.69	3.7		
2.4	26.78	34.16	41.54	48.93	56.31	3.81	3.82	3.83	3.85	3.86	3.87	3.88	3.89	3.9	3.91	3.93	3.94		
2.5	26.97	34.36	41.75	49.14	56.53	3.99	4.01	4.02	4.04	4.06	4.07	4.09	4.1	4.12	4.13	4.15	4.16		
2.6	27.12	34.52	41.91	49.31	56.7	64.09	4.19	4.21	4.23	4.24	4.26	4.28	4.3	4.32	4.34	4.36	4.37		
2.7	27.27	34.66	42.05	49.44	56.83	64.22	4.36	4.38	4.41	4.43	4.45	4.47	4.49	4.51	4.53	4.55	4.58		
2.8	27.39	34.77	42.16	49.54	56.92	64.31	71.69	4.8	4.8	4.8	4.83	4.85	4.87	4.7	4.72	4.75	4.77		
2.9	27.51	34.88	42.25	49.62	57.0	64.37	71.74	4.97	5.02	5.07	4.8	4.83	4.85	4.88	4.9	4.93	4.95		
3.0	27.62	34.97	42.33	49.69	57.05	64.41	71.76	79.12	5.19	5.24	5.29	5.35	5.03	5.05	5.08	5.11	5.14		
3.1	27.72	35.06	42.4	49.74	57.09	64.43	71.77	79.11	5.36	5.41	5.46	5.52	5.57	5.62	5.68	5.28	5.31		
3.2	27.82	35.14	42.46	49.79	57.11	64.44	71.76	79.09	5.58	5.63	5.68	5.74	5.79	5.85	5.9	5.96	5.9		
3.3	27.91	35.22	42.52	49.83	57.13	64.44	71.74	79.05	5.74	5.79	5.85	5.9	5.96	6.02	6.07	6.13			
3.4	28.0	35.29	42.57	49.86	57.14	64.43	71.71	79.0	5.86	5.92	5.97	6.03	6.09	6.15	6.21	6.27	6.33		
3.5	28.09	35.35	42.62	49.88	57.15	64.41	71.68	78.94	5.97	6.03	6.09	6.15	6.21	6.27	6.33	6.39	6.45		
3.6	28.17	35.42	42.66	49.91	57.15	64.39	71.64	78.88	6.08	6.14	6.2	6.26	6.32	6.38	6.44	6.5	6.56		
3.7	28.26	35.48	42.7	49.93	57.15	64.37	71.59	78.81	6.2	6.26	6.32	6.38	6.44	6.5	6.56	6.62	6.68		
3.8	28.34	35.54	42.74	49.94	57.15	64.35	71.55	78.75	6.32	6.38	6.44	6.5	6.56	6.62	6.68	6.74	6.8		
3.9	28.43	35.61	42.78	49.96	57.14	64.32	71.5	78.67	6.44	6.5	6.56	6.62	6.68	6.74	6.8	6.86	6.92		
4.0	28.51	35.67	42.82	49.98	57.13	64.29	71.45	78.6	6.56	6.62	6.68	6.74	6.8	6.86	6.92	6.98	7.04		
4.1	28.59	35.73	42.86	49.99	57.13	64.26	71.39	78.53	6.68	6.74	6.8	6.86	6.92	6.98	7.04	7.1	7.16		
4.2	28.68	35.79	42.9	50.01	57.12	64.23	71.34	78.45	6.8	6.86	6.92	6.98	7.04	7.1	7.16	7.22	7.28		
4.3	28.76	35.85	42.94	50.03	57.11	64.2	71.29	78.38	6.92	6.98	7.04	7.1	7.16	7.22	7.28	7.34	7.4		
4.4	28.84	35.91	42.98	50.04	57.11	64.17	71.24	78.31	7.04	7.1	7.16	7.22	7.28	7.34	7.4	7.46	7.52		
4.5	28.93	35.97	43.01	50.06	57.1	64.15	71.19	78.23	7.16	7.22	7.28	7.34	7.4	7.46	7.52	7.58	7.64		
4.6	29.01	36.03	43.05	50.08	57.1	64.12	71.14	78.16	7.28	7.34	7.4	7.46	7.52	7.58	7.64	7.7	7.76		
4.7	29.09	36.09	43.09	50.09	57.09	64.09	71.09	78.09	7.4	7.46	7.52	7.58	7.64	7.7	7.76	7.82	7.88		
4.8	29.18	36.16	43.13	50.11	57.09	64.07	71.04	78.02	7.52	7.58	7.64	7.7	7.76	7.82	7.88	7.94	8.0		
4.9	29.26	36.22	43.17	50.13	57.09	64.04	71.0	77.95	7.64	7.7	7.76	7.82	7.88	7.94	8.0	8.06	8.12		
5.0	29.35	36.28	43.22	50.15	57.08	64.02	70.96	77.89	7.76	7.82	7.88	7.94	8.0	8.06	8.12	8.18	8.24		
5.1	29.43	36.34	43.26	50.17	57.08	64.0	70.91	77.82	7.88	7.94	8.0	8.06	8.12	8.18	8.24	8.3	8.36		
5.2	29.52	36.41	43.3	50.19	57.08	63.97	70.87	77.76	7.94	8.0	8.06	8.12	8.18	8.24	8.3	8.36	8.42		
5.3	29.6	36.47	43.34	50.21	57.08	63.95	70.82	77.7	8.06	8.12	8.18	8.24	8.3	8.36	8.42	8.48	8.54		
5.4	29.69	36.54	43.39	50.24	57.09	63.94	70.76	77.63	8.18	8.24	8.3	8.36	8.42	8.48	8.54	8.6	8.66		
5.5	29.78	36.61	43.43	50.26	57.09	63.92	70.75	77.57	8.3	8.36	8.42	8.48	8.54	8.6	8.66	8.72	8.78		
5.6	29.87	36.67	43.48	50.29	57.09	63.9	70.71	77.52	8.42	8.48	8.54	8.6	8.66	8.72	8.78	8.84	8.9		
5.7	29.95	36.74	43.53	50.31	57.1	63.89	70.67	77.46	8.54	8.6	8.66	8.72	8.78	8.84	8.9	8.96	9.02		
5.8	30.04	36.81	43.57	50.34	57.1	63.87	70.64	77.4	8.66	8.72	8.78	8.84	8.9	8.96	9.02	9.08	9.14		

KW con el agua se necesita una inversión aproximada de 138 millones de dólares una suma extremadamente elevada si la comparamos lo que tendríamos que invertir para un precio por KW similar que sería 7.35 Millones de dólares. Esto claro está ligado con la capacidad de producir energía como ya se había mencionado y como se comprobado con los resultados la inversión de 138 millones de dólares en un proyecto con fluido de trabajo de agua es directamente proporcional a la capacidad de producir energía, basándose en esto un factor de selección sería que tanto presupuesto se tiene para el proyecto o cuanta energía se desea producir.

En 45 queda en evidencia lo dicho anteriormente la energía generada por el proyecto de 138 millones de dólares es de 132 Mega Watts mientras que la generada

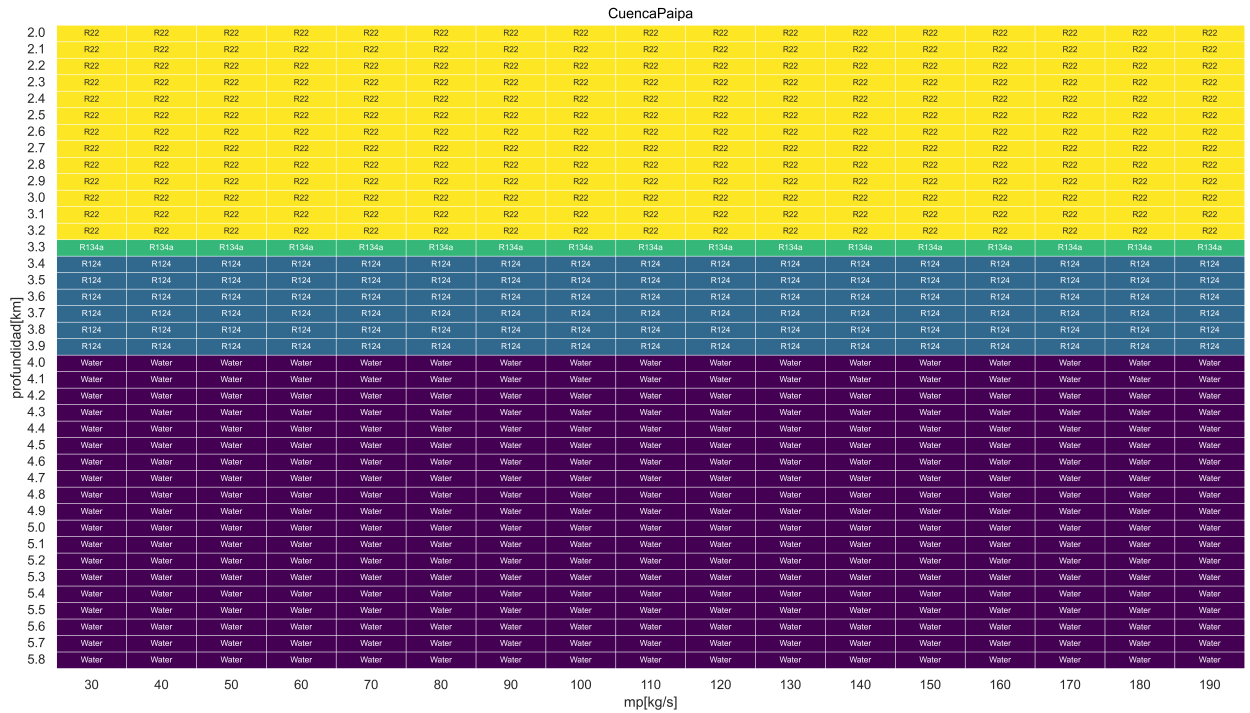
Figura 45. Matriz de selección Paipa Boyacá Mega Watts.

		Cuenca Paipa Mw																
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
2.0	4.25	5.07	7.09	8.6	8.7	8.8	8.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	
2.1	4.87	6.49	8.11	8.68	8.79	8.9	1.02	1.13	1.24	1.36	1.47	1.58	1.69	1.81	1.92	2.03	2.15	
2.2	5.46	7.28	9.11	10.93	9.88	1.0	1.13	1.25	1.38	1.5	1.63	1.75	1.88	2.01	2.13	2.26	2.38	
2.3	6.05	8.07	10.09	12.1	9.96	1.1	1.23	1.37	1.51	1.64	1.78	1.92	2.05	2.19	2.33	2.47	2.6	
2.4	6.62	8.83	11.04	13.25	15.45	1.18	1.33	1.48	1.63	1.78	1.92	2.07	2.22	2.37	2.51	2.66	2.81	
2.5	7.19	9.58	11.98	14.37	16.77	1.27	1.42	1.58	1.74	1.9	2.06	2.21	2.37	2.53	2.69	2.85	3.0	
2.6	7.74	10.32	12.9	15.48	18.06	20.64	1.51	1.68	1.84	2.01	2.18	2.35	2.51	2.68	2.85	3.02	3.19	
2.7	8.28	11.04	13.8	16.56	19.32	22.08	1.56	1.76	1.94	2.12	2.29	2.47	2.65	2.82	3.0	3.17	3.35	
2.8	8.81	11.75	14.68	17.62	20.56	23.49	26.43	1.95	2.03	2.21	2.4	2.58	2.76	2.95	3.13	3.32	3.5	
2.9	9.33	12.44	15.55	18.66	21.77	24.88	27.99	2.04	2.24	2.44	2.49	2.68	2.87	3.06	3.25	3.44	3.64	
3.0	9.84	13.12	16.4	19.68	22.96	26.24	29.52	32.8	2.33	2.54	2.75	2.97	3.16	3.36	3.55	3.75	3.95	
3.1	10.34	13.79	17.24	20.68	24.13	27.58	31.03	34.47	2.41	2.63	2.85	3.07	3.29	3.51	3.73	3.95	4.17	
3.2	10.83	14.45	18.06	21.67	25.28	28.89	32.5	36.11	2.71	2.94	3.16	3.39	3.62	3.84	4.07	4.29	4.52	
3.3	11.32	15.09	18.86	22.63	26.4	30.18	33.95	37.72	41.49	2.78	3.01	3.24	3.48	3.71	3.94	4.17	4.4	
3.4	11.79	15.72	19.65	23.58	27.51	31.44	35.37	39.3	43.23	47.16	51.09	55.02	58.95	3.61	3.83	4.06	4.28	
3.5	12.25	16.34	20.42	24.51	28.59	32.68	36.76	40.85	44.93	49.02	53.1	57.19	61.27	3.72	3.95	4.19	4.42	
3.6	12.71	16.95	21.18	25.42	29.66	33.9	38.13	42.37	46.61	50.84	55.08	59.32	63.55	67.79	4.07	4.31	4.55	
3.7	13.16	17.54	21.93	26.32	30.7	35.09	39.48	43.86	48.25	52.63	57.02	61.41	65.79	70.18	74.56	4.42	4.67	
3.8	13.6	18.13	22.66	27.2	31.73	36.26	40.79	45.33	49.86	54.39	58.92	63.46	67.99	72.52	77.05	81.59	4.78	
3.9	14.03	18.71	23.38	28.06	32.74	37.41	42.09	46.76	51.44	56.12	60.79	65.47	70.15	74.82	79.5	84.18	88.85	
4.0	14.45	19.27	24.09	28.91	33.72	38.54	43.36	48.18	52.99	57.81	62.63	67.45	72.26	77.08	81.9	86.72	91.53	
4.1	14.87	19.82	24.78	29.74	34.69	39.65	44.61	49.56	54.22	59.47	64.43	69.39	74.34	79.3	84.26	89.21	94.17	
4.2	15.28	20.37	25.46	30.55	35.65	40.74	45.83	50.92	56.02	61.11	66.2	71.29	76.38	81.48	86.57	91.66	96.75	
4.3	15.68	20.9	26.13	31.36	36.58	41.81	47.03	52.26	57.46	62.71	67.94	73.16	78.39	83.61	88.84	94.07	99.29	
4.4	16.07	21.43	26.79	32.14	37.5	42.86	48.21	53.57	58.93	64.28	69.64	75.0	80.36	85.71	91.07	96.43	101.78	
4.5	16.46	21.94	27.43	32.91	38.4	43.89	49.37	54.86	60.34	65.83	71.31	76.8	82.29	87.77	93.26	98.74	104.23	
4.6	16.84	22.45	28.06	33.67	39.28	44.9	50.51	56.12	61.73	67.35	72.96	78.57	84.19	89.79	95.41	101.02	106.63	
4.7	17.21	22.94	28.68	34.42	40.15	45.89	51.63	57.36	63.1	68.83	74.57	80.31	86.04	91.78	97.51	103.25	108.99	
4.8	17.67	23.43	29.29	35.15	41.01	46.86	52.72	58.58	64.44	70.29	76.15	82.01	87.87	93.73	99.58	105.44	111.3	
4.9	17.93	23.91	29.89	35.86	41.84	47.82	53.8	59.77	65.75	71.73	77.7	83.68	89.66	95.64	101.61	107.59	113.57	
5.0	18.28	24.38	30.47	36.57	42.66	48.76	54.85	60.95	67.04	73.13	79.23	85.32	91.42	97.51	103.61	109.7	115.8	
5.1	18.63	24.84	31.05	37.28	43.47	49.68	55.89	62.09	68.3	74.51	80.72	86.93	93.14	99.35	105.56	111.77	117.98	
5.2	18.97	25.29	31.61	37.93	44.26	50.58	56.9	63.22	69.55	75.87	82.19	88.51	94.83	101.16	107.48	113.8	120.12	
5.3	19.3	25.73	32.16	38.6	45.03	51.46	57.9	64.33	70.76	77.19	83.63	90.06	96.49	102.93	109.36	115.79	122.22	
5.4	19.62	26.17	32.71	39.25	45.79	52.33	58.87	65.41	71.95	78.5	85.04	91.58	98.12	104.66	111.2	117.74	124.29	
5.5	19.94	26.59	33.24	39.89	46.53	53.18	59.83	66.48	73.12	79.77	86.42	93.07	99.72	106.36	113.01	119.66	126.31	
5.6	20.26	27.01	33.76	40.51	47.26	54.02	60.77	67.52	74.27	81.02	87.77	94.53	101.28	108.03	114.78	121.53	128.29	
5.7	20.56	27.42	34.27	41.12	47.98	54.83	61.69	68.54	75.39	82.25	89.1	95.96	102.81	109.66	116.52	123.37	130.23	
5.8	20.86	27.82	34.77	41.72	48.68	55.63	62.59	69.54	76.49	83.46	90.4	97.36	104.31	111.27	118.22	125.17	132.13	

por el proyecto de 7.35 millones de dólares es de 4.78 Mw niveles completamente diferentes de producción energética y de inversión entonces la utilización o no de fluidos orgánicos va directamente relacionada con la capacidad monetaria que se tenga o la energía que se necesite producir.

**5.3.3. Matriz de selección basándose en el costo total de inversión** Basándose en la importancia del costo total de inversión de un proyecto se decidió repetir la matriz de selección, pero esta vez usado en Costo total de inversión diferente de antes que se usaba el costo por Kw. Esto permite una selección más clara de proyecto en función del presupuesto que se tenga. Esta matriz se puede ver en 46 su

Figura 46. Matriz de selección Paipa Boyacá Costo Total.



distribución interior cambio a comparación con la antigua matriz ahora las diferencias son más claras y se ven de forma horizontal como a medida que se desciende en profundidad los tipos de fluidos cambian en función de esta y del costo total invertido para el proyecto.

Esta matriz permite tomar decisiones basadas en el presupuesto con el que se cuente para el proyecto como podemos observar en ella se ve que a una profundidad menor a los 3 km aproximadamente el fluido que prevalece en un 100 es el R22 ya bajando un poco más se encuentra una pequeña zona dominada por el R134a seguido a una mayor profundidad por el R124 y por último a mayor profundidad está el agua como el único fluido disponible en función del costo total. Al igual que en la

Figura 47. Matriz de selección Paipa Boyacá Impacto ambiental.

Cuenca Paipa Impacto Ambiental

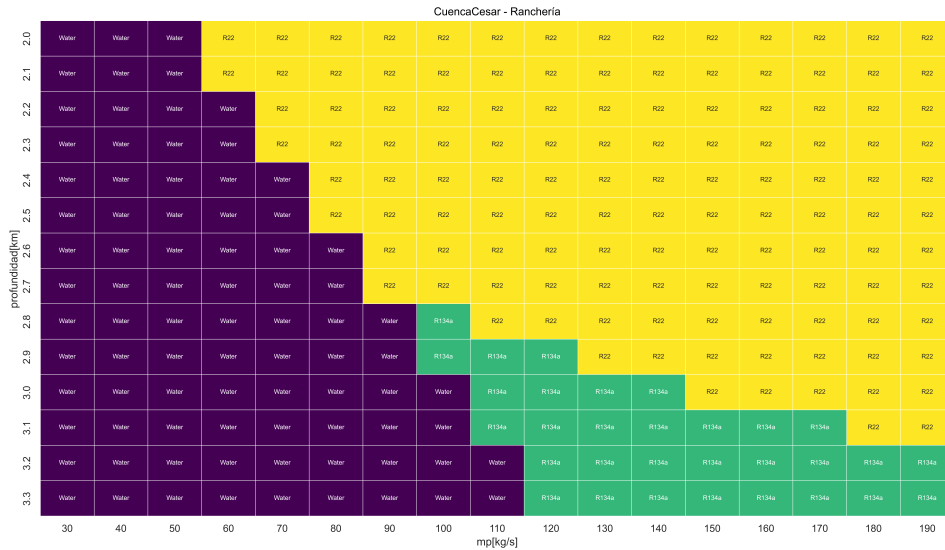
2.0	2.93	3.24	3.56	3.87	4.18	4.49	4.8	5.11	5.42	5.73	6.05	6.36	6.67	6.98	7.29	7.6	7.91
2.1	3.03	3.33	3.64	3.95	4.26	4.57	4.88	5.19	5.5	5.8	6.11	6.42	6.73	7.04	7.35	7.66	7.97
2.2	3.12	3.42	3.73	4.04	4.34	4.65	4.96	5.26	5.57	5.87	6.18	6.49	6.79	7.1	7.4	7.71	8.02
2.3	3.21	3.52	3.82	4.12	4.43	4.73	5.03	5.34	5.64	5.95	6.25	6.55	6.86	7.16	7.46	7.77	8.07
2.4	3.31	3.61	3.91	4.21	4.51	4.81	5.12	5.42	5.72	6.02	6.32	6.62	6.93	7.23	7.53	7.83	8.13
2.5	3.4	3.7	4.0	4.3	4.6	4.9	5.2	5.5	5.8	6.1	6.4	6.7	6.99	7.29	7.59	7.89	8.19
2.6	3.49	3.79	4.09	4.38	4.68	4.98	5.28	5.57	5.87	6.17	6.47	6.76	7.06	7.36	7.66	7.95	8.25
2.7	3.59	3.88	4.18	4.47	4.77	5.06	5.36	5.65	5.95	6.24	6.54	6.83	7.13	7.42	7.72	8.01	8.31
2.8	3.68	3.97	4.26	4.55	4.85	5.14	5.43	5.72	6.02	6.31	6.6	6.89	7.19	7.48	7.77	8.06	8.36
2.9	3.77	4.06	4.35	4.64	4.93	5.22	5.51	5.8	6.09	6.38	6.67	6.96	7.25	7.54	7.83	8.12	8.41
3.0	3.86	4.15	4.43	4.72	5.01	5.29	5.58	5.87	6.16	6.44	6.73	7.02	7.3	7.59	7.88	8.16	8.45
3.1	3.95	4.23	4.52	4.8	5.09	5.37	5.65	5.94	6.22	6.5	6.79	7.07	7.36	7.64	7.92	8.21	8.49
3.2	4.04	4.32	4.6	4.88	5.16	5.44	5.72	6.0	6.28	6.56	6.84	7.12	7.4	7.68	7.96	8.24	8.52
3.3	4.22	4.53	4.84	5.15	5.46	5.76	6.07	6.38	6.69	7.0	7.3	7.61	7.92	8.23	8.54	8.84	9.15
3.4	3.95	4.13	4.32	4.5	4.68	4.87	5.05	5.23	5.42	5.6	5.79	5.97	6.15	6.34	6.52	6.7	6.89
3.5	4.05	4.23	4.42	4.6	4.78	4.97	5.15	5.33	5.52	5.7	5.89	6.07	6.25	6.44	6.62	6.8	6.99
3.6	4.15	4.33	4.52	4.7	4.88	5.07	5.25	5.43	5.62	5.8	5.98	6.17	6.35	6.54	6.72	6.9	7.09
3.7	4.25	4.43	4.62	4.8	4.98	5.17	5.35	5.53	5.72	5.9	6.08	6.27	6.45	6.63	6.82	7.0	7.18
3.8	4.35	4.53	4.72	4.9	5.08	5.27	5.45	5.63	5.81	6.0	6.18	6.36	6.55	6.73	6.91	7.1	7.28
3.9	4.45	4.63	4.81	5.0	5.18	5.36	5.55	5.73	5.91	6.09	6.28	6.46	6.64	6.82	7.01	7.19	7.37
4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8

matriz pasada se pueden obtener los costos, el impacto ambiental, la energía producida y otras variables que se pueden extraer de la matriz en función del interés a la hora de seleccionar un fluido.

**5.3.4. Comparación de Paipa con las demás Cuencas** Las simulaciones anteriores se hicieron para cada una de las cuencas sedimentarias del país dando configuraciones de matrices diferentes en función de los gradientes geotérmicos de cada lugar y a la profundidad a la que se hicieron las mediciones en los pozos.

Como se puede ver en 48 la configuración de la matriz cambia en función de lo

Figura 48. Matriz de selección Cesar Ranchería.



anteriormente dicho entonces para comparar el rendimiento de Paipa frente a las otras cuencas arrojé los siguientes resultados que van acorde a lo que indican las configuraciones de las matrices de selección.

En 49 se puede observar diferentes proyectos en un rango de 3500 dólares por Kw en donde están organizados el menor precio por Kw brindando una visión de la posición geotérmica de Paipa dentro de todos los gradientes geotérmicos podemos observar que dentro de los primeros mejores 30 proyectos que se pueden tener con los fluidos analizados en el puesto número 13 se encuentra uno con un precio por Kw de 3534 dólares por Kw.

Este proceso se puede hacer función de muchas características, pero al final el que dicta cuál es mejor cuenca o no es el gradiente geotérmico de la región.

Figura 49. Comparación entre diferentes cuencas.

	Lugar	SKw	IA	CostoTotal	Mw	Fluido	profundidad
0	Guajira	3504.258780	8.014704	6.891433	1.966588	R134a	4.2
1	Guajira Offshore	3505.132521	4.200000	51.699796	14.749741	Water	4.2
2	Urabá	3505.132521	4.200000	51.699796	14.749741	Water	4.2
3	Caguán-Putumayo	3506.341491	2.600000	19.721082	5.624404	Water	2.6
4	Catatumbo	3508.363009	4.866368	5.988167	1.706827	R124	3.4
5	Guajira	3510.827850	7.147672	8.235286	2.345682	R124	4.6
6	Los Cayos	3518.472433	5.712818	5.427547	1.542586	R22	3.4
7	VMM	3519.223117	2.200000	92.898701	26.397503	Water	2.2
8	Cesar - Ranchería	3524.449926	5.000043	2.531200	0.718183	R134a	1.8
9	Sinú Offshore	3525.995922	8.664518	6.829893	1.937011	R134a	4.2
10	Chocó	3529.130784	9.705280	7.436915	2.107294	R134a	4.6
11	Catatumbo	3533.631522	4.352131	4.128621	1.168379	R124	2.2
12	Cesar - Ranchería	3534.228777	4.753433	3.612229	1.022070	R134a	2.2
13	Paipa	3534.964902	5.000077	2.524351	0.714109	R134a	1.8
14	Cordillera Oriental	3534.964902	5.000077	2.524351	0.714109	R134a	1.8
15	Caguán-Putumayo	3539.240485	4.055500	4.712477	1.331494	R124	2.6
16	Catatumbo	3541.458169	4.641410	2.803032	0.791491	R124	1.8
17	Cordillera Oriental	3544.311491	4.753515	3.610378	1.018640	R134a	2.2
18	Paipa	3544.311491	4.753515	3.610378	1.018640	R134a	2.2
19	VMM	3552.133191	2.200000	78.139538	21.997919	Water	2.2
20	Cauca - Patía	3552.197734	7.805074	6.589235	1.854974	R22	4.2
21	VIM	3554.200755	6.739981	7.578405	2.132239	R124	4.2
22	Cordillera Oriental	3554.359300	2.040758	0.051878	0.014596	R134a	1.4
23	Paipa	3554.359300	2.040758	0.051878	0.014596	R134a	1.4
24	Área no prospectiva	3556.287265	1.000000	135.222506	38.023505	Water	1.0
25	VIM	3558.177451	7.624015	6.208584	1.744878	R134a	3.8
26	Los Cayos	3560.163113	4.759369	4.836527	1.358513	R124	2.6
27	Área no prospectiva	3564.649589	1.000000	120.480418	33.798671	Water	1.0
28	Cauca - Patía	3566.704815	4.200000	66.449106	18.630391	Water	4.2
29	VSM	3567.066048	1.800000	136.447534	38.252035	Water	1.8

## 6. Conclusiones

- Los fluidos orgánicos basándose en la segunda ley de la termodinámica presentan un menor rendimiento que el agua en todos los rangos de temperatura evaluados, estos tienen la característica de aprovechar en menor medida la exergía disponible en determinadas situaciones si se compara con el agua por ende basándose en este parámetro de aprovechamiento energético el estos están una escala menor de desempeño frente al agua.
- En cuanto al impacto ambiental que se pueda causar por la realización de uno de estos proyectos dependerá de la magnitud del proyecto y el fluido que se vaya a usar basándose en la selección del mejor fluido con alguna matriz de selección para los gradientes geotérmicos de Paipa Boyacá, y también dependerá a la profundidad a la que sea necesario llegar para alcanzar determinada temperatura. En cuanto a la profundidad los fluidos orgánicos presentan un rango de operación de bajas profundidades por ende el impacto ambiental causado por la excavación en estos casos es menor que el del agua, pero solo relacionado con la profundidad por que los fluidos orgánicos siguen siendo más contaminantes a causa de las partículas emitidas por la utilización de estos. El menor impacto ambiental se podría causar usando un fluido como el R22 a bajas profundidades con calificaciones de impacto desde 3.87 hasta 8.49 a mayores profundidades. Todo dependerá de las necesidades del proyecto que se vaya a realizar porque hay mucha variedad de proyectos en los que el impacto ambiental varía desde 2 hasta casi 10 para las matrices analizadas.

- Matemáticamente se modeló el sistema con ayuda del lenguaje Python todas las librerías usadas como CoolProp para las propiedades y una programación orientada a objetos se logró un modelo matemático computacional complejo y muy potente que presenta una gran versatilidad a la hora de analizar todas las variables que entran en juego a la hora de determinar parámetros como el precio de KW de una manera rápida y completa en el que se tuvieron en cuenta desde parámetros del fluido hasta costos del terreno haciéndolo un modelo robusto a pesar de que en cuestiones de transferencia de calor se hicieron muchas simplificaciones los resultados son acordes a la literatura.
- La generación de energía eléctrica aprovechando energía geotérmica en Paipa Boyacá presenta una gran variedad de miles de dólares por KW en su mayoría muy buenos proyectos si se compara con otros métodos de generación de energía usados actualmente en donde se encuentran rangos de precios desde 2000 \$/Kw hasta 10000 \$/Kw todo dependerá que tanto impacto ambiental se esté dispuesto a tomar para un proyecto cual sea la necesidad de Mw o otros factores que se acomodan mejor para determinadas situaciones. Comparada con otras cuencas del País a pesar de no ser una de las que tenga un mejor gradiente geotérmico si es una de las mejores. Posicionando cualquier realización de un ciclo Rankine orgánico para el aprovechamiento de energía geotérmica como muy viables si se compara con otras formas de generación de energía eléctrica.

## BIBLIOGRAFÍA

Aragon. *Capturando el potencial geotermico en America latina y el caribe*. 2020 (vid. pág. 22).

Arrieta. *OPTIMIZACION DE UN CICLO ORGANICO DE RANKINE (ORC) USANDO RECURSOS GEOTERMALES DE BAJA ENTALPIA*. 2012 (vid. pág. 32).

Bell, Ian H. y col. "Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp". En: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 53.6 (2014), págs. 2498-2508. DOI: 10.1021/ie4033999. eprint: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie4033999> (vid. pág. 45).

Bosch. *Modelo termo económico de una central térmica de ciclo combinado*. 2007 (vid. pág. 36).

*Design of organic rankine cycles for conversion of waste heat in a polygeneration plant* (vid. pág. 46).

Fandiño. *Ciclo de Rankine*. 2013 (vid. págs. 25, 27).

IDEAM. *Formación y destrucción del ozono estratosférico*. 2004 (vid. pág. 40).

Leyte. *Análisis de costos de operación exergoeconómicos a un ciclo teórico de refrigeración por compresión de vapor usando HFC-134a*. 2012 (vid. págs. 37, 38).

Macchi. *FOrganic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*. 2016 (vid. págs. 27, 29-31, 39).

*Mapa preeliminar de gradientes geotermicos colombianos* (vid. págs. 19, 42, 43).

Matthew. *Capturando el potencial geotérmico en América Latina y El Caribe: Una perspectiva del camino a seguir*. 2020 (vid. pág. 18).

Mentor. *Essential to sustainable growth*. 2016 (vid. págs. 21, 23).

Monica. *Un sismo "despertó el Anillo de fuego": ¿hay algo de qué preocuparse?* 2018 (vid. pág. 24).

Sanchez, Ernesto. *Optimización termica y economica de un ciclo rankine organico que aprovecha el calor residual de los motores de combustión interna*. 2021 (vid. págs. 39-41).

Sanguinetti, Ernesto. *Efecto de los refrigerantes en el Calentamiento Atmosférico: Huella de Carbono y Potencial de Calentamiento Atmosférico*. 2021 (vid. pág. 40).

Square. *Statistical Review of World Energy*. 2021 (vid. pág. 21).

## Apéndices

### Anexo A. Código de las funciones

```
1 Rankine4(Fluido, To=25+273, Th=100+273, n_tur=0.9, n_com=0.9):
2     E1 = propiedades('T', To + 10, 'Q', 0, Fluido)
3     Psat = CP.PropsSI('P', 'Q', 0, 'T', Th-10, Fluido)
4     E2s = propiedades('P', Psat, 'S', E1[4], Fluido)
5     h2r = (E2s[3] - E1[3]) / (n_com) + E1[3]
6     E2 = propiedades('P', Psat, 'H', h2r, Fluido)
7     E3 = propiedades('P', Psat, 'T', Th, Fluido)
8     E4s = propiedades('S', E3[4], 'P', E1[1], Fluido)
9     h4r = -n_tur * (E3[3] - E4s[3]) + E3[3]
10    E4 = propiedades('H', h4r, 'P', E1[1], Fluido)
11    n_carnot = 1 - (To) / (Th)
12    wcom = E2[3] - E1[3]
13    qin = E3[3] - E2[3]
14    wnet = E3[3] - h4r - wcom
15    n_i = wnet / qin
16    n_opt = n_i / n_carnot
17    Col = ['T[k]', 'P[pa]', 'u[j/kg]', 'h[j/kg]', 's[j/kg]', 'X', 'V[pa*s]', 'k
18           [w/m^2]', 'Cp[j/(kg*k)]', 'd[kg/m3]']
19    ide = ['Estado 1', 'Estado 2', 'Estado 3', 'Estado 4']
20    Estados = pd.DataFrame([E1, E2, E3, E4], columns = Col, index = ide)
21    return n_i, n_carnot, n_opt, Estados, wnet, Th, To, Fluido
```

### Función para graficar Estados

```
1 def plot_termo(Rankine):
2     try:
3         Estados = Rankine[3]
4         Fluido = Rankine[7]
```

```

5 plt.plot(Estados['s[j/kg]'],Estados['T[k]'] , 'o')
6 st ,ts,st2,ts2= domo('S','T',Fluido)
7 plt.plot(st,ts,label='Fluid')
8 plt.plot(st2,ts2,label = 'Vapor')
9 plt.xlabel('Entropia [j/kg*k]')
10 plt.ylabel('Temperatura [k]')
11 TP2 = grafica('T','P',Estados['P[pa]']['Estado 1'],'S',Estados['s[
j/kg]']['Estado 1'],Estados['s[j/kg]']['Estado 4'],100,Fluido)
12 S = np.arange(Estados['s[j/kg]']['Estado 1'],Estados['s[j/kg]']['
Estado 4'],100)
13 plt.plot(S,TP2,'--',color = 'gray',label = 'Pmin')
14 TP = grafica('T','P',Estados['P[pa]']['Estado 2'],'S',Estados['s[j
/kg]']['Estado 2'],Estados['s[j/kg]']['Estado 3'],100,Fluido)
15 S1 = np.arange(Estados['s[j/kg]']['Estado 2'],Estados['s[j/kg]']['
Estado 3'],100)
16 plt.plot(S1,TP,'--',color = 'gray',label = 'Pmax')
17 for i, txt in enumerate(Estados.index):
18 plt.annotate(txt, (Estados.iloc[i][4], Estados.iloc[i][0]))
19 plt.title(str(Fluido))
20 plt.legend()
21 except :
22 pass

```

## Funciones Termo económicas

```

1 def pwf(i,n):
2     return (1+i)**(-n)
3
4 def spwf(i,n):
5     return (1-(1+i)**(-n))/i
6
7 def reducw(n):
8     return (-0.007352941*n+0.9093529)

```

```

9
10 def fuel(n,i,V,pf,n_cambios = 2):
11
12     i = i/100
13     horas = 24*365
14     colum = ['PWF', 'SPWF', '$/m3', '$']
15     index = np.arange(0,n,1)
16     tabla = pd.DataFrame(columns = colum,index =index)
17
18     for a1 in range(n):
19         tabla['PWF'][a1] = pwf(i,a1+1)
20         tabla['SPWF'][a1] = spwf(i,a1+1)
21         tabla['$/m3'][a1] = pf*(1+i)**(a1+1)
22         V_anual = n_cambios*10*V
23         tabla['$'][a1] = V_anual*tabla['$/m3'][a1]
24         total = tabla['$'].sum()
25     return tabla,total
26
27 def cost_estimation(EC):
28     inde = ['Purchased Equipement',
29            'Purchased Equipement installation',
30            'Instrumentation',
31            'Piping',
32            'Electrical',
33            'Buildings',
34            'Yard improvements',
35            'Service Facilities',
36            'Engeneering and supervision',
37            'Construction Expenses',
38            'Legal Expenses ',
39            'Contractor Fee',
40            'Contingency', 'FCI']
41     Ce = pd.DataFrame(columns = ['%PE', 'Cost'],index = inde)

```

```

42 Ce.index.name = 'Component'
43 Ce['%PE'] = [100,40,43,31,10,15,12,55,32,34,4,19,37,0]
44 pd.set_option('mode.chained_assignment', None)
45 for a1,a2 in Ce.iterrows():
46 Ce['Cost'][a1] = EC*a2[0]/100
47 Ce['Cost']['FCI'] =Ce['Cost'].sum()
48 Ce['%PE']['FCI'] =Ce['%PE'].sum()
49
50 return Ce ,Ce['Cost']['FCI']
51
52 def kw_life(n,kw):
53 horas = 24*365
54 ind = np.arange(0,n,1)
55 tabla = pd.DataFrame(columns = ['Kw'],index = ind)
56 for ai in range(n):
57 tabla['Kw'][ai] = horas*kw*reducw(ai)
58 return tabla
59
60 def cost_power_plant(Rankine,mp,n = 35 ,i = 7,pf = 0):
61 Lmtd = (-Rankine[5]+Rankine[3]['T[k]']['Estado 1']+10)/(np.log(10/(
Rankine[5]- Rankine[3]['T[k]']['Estado 1'])))
62 U= 1000
63 A = (Rankine[3]['h[j/kg]']['Estado 3']-Rankine[3]['h[j/kg]']['
Estado 1'])*mp/(Lmtd*U)
64 Vex = mp/Rankine[3]['d[kg/m3]']['Estado 4']
65 C_fuel = fuel(n,i,Vex,pf,n_cambios = 2)[1]
66 if Rankine[-1] == 'Water':
67
68 C_tur_pol = 33915 + 10932*Vex + -8.01*Vex**2
69 C_tur = 7780*Vex + 213702
70 C_pumb = (68212*mp/Rankine[3]['d[kg/m3]']['Estado 1']+ 19517)*0.6
71 C_boilerx =(-10483 + 7133*A + 51.3*A**2 + -0.527*A**3 + 1.8E-03*A
**4 + -2.72E-06*A**5 + 1.54E-09*A**6-10483 + 7133*A + 51.3*A**2 +

```

```

-0.527*A**3 + 1.8E-03*A**4 + -2.72E-06*A**5 + 1.54E-09*A**6)*0.13
72 C_boiler = (1.743e-4*A + 1.327e-2)*1e6*1.22
73 tabla, fci = cost_estimation(C_tur + C_boiler + C_pumb)
74 C_T = fci
75 price_kw = C_T*1000/(Rankine[4]*mp)
76 else:
77 C_tur = 12000*Vex
78 C_pumb = (68212*mp/Rankine[3]['d[kg/m3]']['Estado 1']+ 19517)*0.6
79 C_boilerx = (-10483 + 7133*A + 51.3*A**2 + -0.527*A**3 + 1.8E-03*A
**4 + -2.72E-06*A**5 + 1.54E-09*A**6-10483 + 7133*A + 51.3*A**2 +
-0.527*A**3 + 1.8E-03*A**4 + -2.72E-06*A**5 + 1.54E-09*A**6)*0.13
80 C_boiler = (1.743e-4*A + 1.327e-2)*1e6*1.22
81 tabla, fci = cost_estimation(C_tur + C_boiler + C_pumb)
82 C_T = fci +C_fuel
83 price_kw = C_T*1000/(Rankine[4]*mp)
84
85 return C_tur, C_boiler, C_pumb, C_T, C_T/(Rankine[4]*mp*1e3), tabla, fci,
C_fuel

```

## Clase Rankine

```

1 class Rankine:
2     def __init__(self, fluido = 'Water', th = 339, mp = 10, To = 25+273,
n_tur=0.9, n_com=0.9, n = 35, i = 7, pf = 100, mdk = 1.5e6, profundidad
= 0, lugar = None):
3         self.fluido = fluido
4         self.th = th
5         self.mp = mp
6         self.to = To
7         self.n_tur = n_tur
8         self.n_com = n_com
9         self.profundidad = profundidad
10        self.n = n

```

```

11     self.i = i
12     self.pf = pf
13     self.mdk = mdk
14     self.lugar = lugar
15     self.termodinamica()
16     self.cost_power_plant()
17     self.impacto_ambiental()
18
19
20     def termodinamica(self):
21         Fluido = self.fluido
22         Th = self.th
23         To = self.to
24         n_tur = self.n_tur
25         n_com = self.n_com
26         E1 = propiedades('T',To + 10,'Q',0,Fluido)
27         Psat = CP.PropsSI('P','Q',0,'T',Th-10,Fluido)
28         E2s = propiedades('P',Psat,'S',E1[4],Fluido)
29         h2r = (E2s[3]-E1[3])/(n_com) + E1[3]
30         E2 = propiedades('P',Psat,'H',h2r,Fluido)
31         E3 = propiedades('P',Psat,'T',Th,Fluido)
32         E4s = propiedades('S',E3[4],'P',E1[1],Fluido)
33         h4r = -n_tur*(E3[3]-E4s[3]) + E3[3]
34         E4 = propiedades('H',h4r,'P',E1[1],Fluido)
35         n_carnot = 1 - (To)/(Th)
36         wcom = E2[3]-E1[3]
37         qin = E3[3] -E2[3]
38         wnet = E3[3]-h4r - wcom
39         n_i = wnet/qin
40         n_opt = n_i/n_carnot
41         Col = ['T[k]', 'P[pa]', 'u[j/kg]', 'h[j/kg]', 's[j/kg]', 'X', 'V[pa*s]',
42              'k[w/m^2]', 'Cp[j/(kg*k)]', 'd[kg/m3]']
43         ide = ['Estado 1', 'Estado 2', 'Estado 3', 'Estado 4']

```

```

43     Estados = pd.DataFrame([E1,E2,E3,E4],columns = Col ,index = ide)
44     self.n_i = n_i
45     self.n_carnot = n_carnot
46     self.n_opt = n_opt
47     self.Estados = Estados
48     self.Wnet= wnet
49
50     self.Mw = self.Wnet*self.mp/1e6
51
52     def cost_power_plant(self):
53         mp = self.mp
54         n = self.n
55         i = self.i
56         pf = self.pf
57         profundidad = self.profundidad
58         mdk = self.mdk
59         Rankine = Rankine4(Fluido= self.fluido , Th = self.th,n_tur = self
60 .n_tur,n_com = self.n_com)
61         Lmtd = (Rankine[3]['T[k]']['Estado 1'])
62         Lmtd = (-Rankine[5]+Rankine[3]['T[k]']['Estado 1']+10)#/(np.log
63 (10/(Rankine[5]- Rankine[3]['T[k]']['Estado 1'])))
64         U= 1000
65         A = (Rankine[3]['h[j/kg]']['Estado 3']-Rankine[3]['h[j/kg]']['
66 Estado 1'])*mp/(Lmtd*U)
67         Vex = mp/Rankine[3]['d[kg/m3]']['Estado 4']
68         self.Vf = Vex
69         C_fuel = fuel(n,i,Vex,pf,n_cambios = 2)[1]
70
71         if Rankine[-1] == 'Water':
72             C_tur_pol = 33915 + 10932*Vex + -8.01*Vex**2
73             C_tur = 7780*Vex + 213702
74             C_pumb = (68212*mp/Rankine[3]['d[kg/m3]']['Estado 1']+ 19517)
75             *0.6

```

```

72     C_boilerx =(-10483 + 7133*A + 51.3*A**2 + -0.527*A**3 + 1.8E-03*
A**4 + -2.72E-06*A**5 + 1.54E-09*A**6-10483 + 7133*A + 51.3*A**2 +
-0.527*A**3 + 1.8E-03*A**4 + -2.72E-06*A**5 + 1.54E-09*A**6)*0.13
73     C_boiler = (1.743e-4*A + 1.327e-2)*1e6*1.22
74     tabla,fci = cost_estimation(C_tur + C_boiler + C_pumb)
75     C_T = fci + profundidad*mdk
76     price_kw = C_T/(Rankine[4]*mp/1e3)
77     else:
78         C_tur = 12000*Vex
79         C_pumb = (68212*mp/Rankine[3]['d[kg/m3]']['Estado 1']+ 19517)
*0.6
80         C_boilerx =(-10483 + 7133*A + 51.3*A**2 + -0.527*A**3 + 1.8E-03*
A**4 + -2.72E-06*A**5 + 1.54E-09*A**6-10483 + 7133*A + 51.3*A**2 +
-0.527*A**3 + 1.8E-03*A**4 + -2.72E-06*A**5 + 1.54E-09*A**6)*0.13
81         C_boiler = (1.743e-4*A + 1.327e-2)*1e6*1.22
82         tabla,fci = cost_estimation(C_tur + C_boiler + C_pumb)
83         C_T = fci +C_fuel + profundidad*mdk
84         price_kw = C_T/(Rankine[4]*mp/1e3)
85
86         self.C_tur = C_tur
87         self.C_boile = C_boiler
88         self.C_pumb = C_pumb
89         self.C_T = C_T
90         self.price_kw = price_kw
91         self.tabla = tabla
92         self.fci = fci
93         self.C_fuel = C_fuel
94
95     def impacto_ambiental(self) :
96         tabla = {'R22':[0.055,1760],
97                 'R134a':[0.0,1300],
98                 'R124':[0.022,527],
99                 'Water':[0,0]}

```

```

100     self.IA = self.Vf*(tabla[self.fluido][0] + tabla[self.fluido
101 ] [1]) + self.profundidad*1000
102
103 def presentacion(self):
104     print("Planta de potencia "+self.lugar)
105     print("Fluido de trabajo :",self.fluido)
106     print("Vida Util : ",self.n," Años")
107     print("Capacidad : ",self.Mw,"Mw")
108     print("Eficiencia Operacional :",self.n_opt)
109     print("Costo del Kw : ",self.price_kw,"$/Kw")
110     print("Costo de la turbina : ",self.C_tur/1e6,"mill$")
111     print('Impacto ambiental :' ,self.IA/1e3)
112     print('Profundidad [Km ] : ',self.profundidad)
113     print(self.tabla)
114     print("")
115     print("Costo final de la planta de potencia :",self.C_T/1e6,"mill$
116 ")

```

## Simulacion 1

```

1
2 name = 'Paipa'
3 dtprom = (Cuencas['dTmin']['Paipa'] + Cuencas['dTmax']['Paipa'])*0.5
4 for fluid in fluidos :
5     T1 = 330
6     T2 = 370
7     mp = np.round(np.logspace(1.4,2.3,num = 10),3)
8     Th = np.arange(T1,T2,(T2-T1)/len(mp))
9     precios2 = pd.DataFrame(index = mp,columns = Th,dtype = "float")
10    for a1 in Th :
11    for a2 in mp:
12    prof = (a1-273)/(dtprom)

```

```

13 precios2[a1][a2] = Rankine(fluid,mp = a2,th = a1,pf = 100,
    profundidad = prof).price_kw
14 plt.figure()
15 f, ax = plt.subplots(figsize=(20, 5))
16 sns.heatmap(precios2/1e3, annot=True, linewidths=.5, ax=ax,cmap = '
    Spectral_r')
17 plt.title(name+' '+fluid + ' $/Kw')
18 plt.xlabel('Th[K]')
19 plt.ylabel('m[kg/s]')
20 plt.savefig(path + '10' + name + '_' + fluid + 'SKw' )
21

```

## Simulacion 2

```

1
2 name = 'Paipa'
3 dtprom = (Cuencas['dTmin']['Paipa'] + Cuencas['dTmax']['Paipa'])*0.5
4 for fluid in fluidos :
5
6     T1 = 330
7     T2 = 370
8     mp = np.round(np.logspace(1.4,2.3,num = 10),3)
9     Th = np.arange(T1,T2,(T2-T1)/len(mp))
10    precios2 = pd.DataFrame(index = mp,columns = Th,dtype = "float")
11    for a1 in Th :
12        for a2 in mp:
13            prof = (a1-273)/(dtprom)
14            precios2[a1][a2] = Rankine(fluid,mp = a2,th = a1,pf = 100,
                profundidad = prof).IA
15
16    plt.figure()
17    f, ax = plt.subplots(figsize=(20, 5))

```

```

18 sns.heatmap(precios2/1e3, annot=True, linewidths=.5, ax=ax, cmap =
    colwarm)
19 plt.title(name+' '+fluid + ' Impacto Ambiental')
20 plt.xlabel('Th[K]')
21 plt.ylabel('m[kg/s]')
22 plt.savefig(path + '11' + name + '_' + fluid + 'IA' )

```

### Simulacion 3

```

1
2 name = 'Paipa'
3 dtprom = (Cuencas['dTmin']['Paipa'] + Cuencas['dTmax']['Paipa'])*0.5
4 for fluid in fluidos :
5     T1 = 330
6     T2 = 370
7     mp = np.round(np.logspace(1.4,2.3,num = 10),3)
8     Th = np.arange(T1,T2,(T2-T1)/len(mp))
9     precios2 = pd.DataFrame(index = mp,columns = Th,dtype = "float")
10    for a1 in Th :
11        for a2 in mp:
12            prof = (a1-273)/(dtprom)
13            precios2[a1][a2] = Rankine(fluid,mp = a2,th = a1,pf = 100,
                profundidad = prof).Mw
14
15    plt.figure()
16    f, ax = plt.subplots(figsize=(20, 5))
17    sns.heatmap(precios2, annot=True, linewidths=.5, ax=ax, cmap =
        morado)
18    plt.title(name+' '+fluid + ' MW')
19    plt.xlabel('Th[K]')
20    plt.ylabel('m[kg/s]')
21    plt.savefig(path + '12'+ name + '_' + fluid + 'MW' )
22

```

## Simulacion 5

```
1
2 colormap = 'viridis'
3 for a1,a2 in Cuencas.iterrows():
4     print(a2.name)
5     prof = a2['profundidad[m]']
6     dtprom = (a2['dTmin'] + a2['dTmax'])*0.5
7     matrix_performance = pd.DataFrame(index = np.arange(2,prof/1000,0.1),
8         columns = np.arange(30,200,10))
9     matrix_performance.iloc[0][0] = 100e7
10    matrix_performance
11    a = 0
12    fluids = ['Water', 'R124', 'R134a', 'R22']
13    for fluid in fluids :
14        print(fluid)
15        for prof in tqdm(matrix_performance.index):
16            for mp in matrix_performance.columns:
17                th = dtprom*prof + 273
18                if a == 0 :
19                    try :
20                        rankine = Rankine(fluid,th = th,profundidad = prof,mp =mp)
21                        matrix_performance[mp][prof] = rankine
22
23                    except :
24                        matrix_performance[mp][prof] = Rankine('Water',mp = 0.11,th =
25                            330,n = 60)
26
27                if a == 1:
28                    try :
29                        rankine = Rankine(fluid,th = th,profundidad = prof,mp =mp)
30                        if matrix_performance[mp][prof].price_kw > rankine.price_kw :
```

```

30     matrix_performance[mp][prof] = rankine
31     except :
32         pass
33         a = 1
34
35     fluidos_frame = pd.DataFrame(index = matrix_performance.index ,
36         columns = matrix_performance.columns)
37     precios_frame = pd.DataFrame(index = matrix_performance.index ,
38         columns = matrix_performance.columns)
39     capacidad_frame = pd.DataFrame(index = matrix_performance.index ,
40         columns = matrix_performance.columns)
41     ct_frame = pd.DataFrame(index = matrix_performance.index , columns =
42         matrix_performance.columns)
43     impacto_ambiental= pd.DataFrame(index = matrix_performance.index ,
44         columns = matrix_performance.columns)
45
46     for mp in matrix_performance.columns:
47     for prof in matrix_performance.index:
48     fluidos_frame[mp][prof] = matrix_performance[mp][prof].fluido
49     precios_frame[mp][prof] = np.round(matrix_performance[mp][prof].
50         price_kw/1000,2)
51     capacidad_frame[mp][prof] = np.round(matrix_performance[mp][prof].
52         Mw,2)
53     ct_frame[mp][prof] = np.round(matrix_performance[mp][prof].C_T/1e6
54         ,2)
55     impacto_ambiental[mp][prof] = np.round(matrix_performance[mp][prof
56         ].IA/1e3,2)
57
58     fluidos_frame = fluidos_frame.fillna(0)
59     precios_frame = precios_frame.fillna(0)
60     capacidad_frame = capacidad_frame.fillna(0)
61     ct_frame = ct_frame.fillna(0)

```

```

54 impacto_ambiental = impacto_ambiental.fillna(0)
55
56 fluidos_frame =fluidos_frame.set_index(np.round(fluidos_frame.index
57 ,3))
58 precios_frame =precios_frame.set_index(np.round(precios_frame.index
59 ,3))
60 capacidad_frame =capacidad_frame.set_index(np.round(capacidad_frame.
61 index,3))
62 ct_frame =ct_frame.set_index(np.round(ct_frame.index,3))
63 impacto_ambiental =impacto_ambiental.set_index(np.round(
64 impacto_ambiental.index,3))
65
66 fluids = {'Water':0,'R124':1,'R134a':2,'R22':3}
67
68 plt.figure()
69 f, ax = plt.subplots(figsize=(18,10))
70 hm = sns.heatmap(fluidos_frame.replace(fluids),cmap = colormap, ax=
71 ax, linewidths=.5, cbar=False,annot =fluidos_frame,annot_kws={"size
72 ": 7},fmt = '')
73
74 plt.title('Cuenca' + a2.name)
75 plt.xlabel('mp[kg/s]')
76 plt.ylabel('profundidad[km]')
77 # plt.show()
78 plt.savefig(path + '20' + 'Cuenca' + a2.name + '.png')
79
80
81 plt.figure()
82 f, ax = plt.subplots(figsize=(18,10))
83 hm = sns.heatmap(fluidos_frame.replace(fluids),cmap = colormap, ax=
84 ax, linewidths=.5, cbar=False,annot =precios_frame,annot_kws={"size
85 ": 7},fmt = '')
86
87 plt.title('Cuenca ' + a2.name + " $/Kw")
88 plt.xlabel('mp[kg/s]')

```

```

79 plt.ylabel('profundidad[km]')
80 # plt.show()
81 plt.savefig(path + '20' + 'Cuenca' + a2.name + "SKw"+ '.png')
82
83 plt.figure()
84 f, ax = plt.subplots(figsize=(18,10))
85 hm = sns.heatmap(fluidos_frame.replace(fluids),cmap = colormap, ax=
    ax, linewidths=.5, cbar=False,annot = capacidad_frame,annot_kws={"
    size": 7},fmt = '')
86 plt.title('Cuenca ' + a2.name + " Mw")
87 plt.xlabel('mp[kg/s]')
88 plt.ylabel('profundidad[km]')
89 # plt.show()
90 plt.savefig(path + '20' + 'Cuenca' + a2.name + "Mw" + 'png')
91
92
93 plt.figure()
94 f, ax = plt.subplots(figsize=(18,10))
95 hm = sns.heatmap(fluidos_frame.replace(fluids),cmap = colormap, ax=
    ax, linewidths=.5, cbar=False,annot = ct_frame,annot_kws={"size":
    7},fmt = '')
96 plt.title('Cuenca ' + a2.name + " Costo total")
97 plt.xlabel('mp[kg/s]')
98 plt.ylabel('profundidad[km]')
99 # plt.show()
100 plt.savefig(path + '20' + 'Cuenca ' + a2.name + " Costo total"+'png'
    )
101
102 plt.figure()
103 f, ax = plt.subplots(figsize=(18,10))
104 hm = sns.heatmap(fluidos_frame.replace(fluids),cmap = colormap, ax=
    ax, linewidths=.5, cbar=False,annot = impacto_ambiental,annot_kws={"
    size": 7},fmt = '')

```

```

105 plt.title('Cuenca ' + a2.name + " Impacto Ambiental")
106 plt.xlabel('mp[kg/s]')
107 plt.ylabel('profundidad[km]')
108 plt.savefig(path + '20'+ 'Cuenca ' + a2.name + " Impacto Ambiental
    "+ 'png')
109
110
111
112

```

## Simulacion 6

```

1 colormap = 'viridis'
2 for a1,a2 in Cuencas.iterrows():
3     print(a2.name)
4     prof = a2['profundidad[m]']
5     dtprom = (a2['dTmin'] + a2['dTmax'])*0.5
6     matrix_performance = pd.DataFrame(index = np.arange(2,prof/1000,0.1),
    columns = np.arange(30,200,10))
7     matrix_performance.iloc[0][0] = 100e7
8     matrix_performance
9     a = 0
10    fluids = ['Water', 'R124', 'R134a', 'R22']
11    for fluid in fluids :
12        print(fluid)
13        for prof in tqdm(matrix_performance.index):
14            for mp in matrix_performance.columns:
15                th = dtprom*prof + 273
16                if a == 0 :
17                    try :
18                        rankine = Rankine(fluid,th = th,profundidad = prof,mp =mp)
19                        matrix_performance[mp][prof] = rankine
20                    except :

```

```

21     matrix_performance[mp][prof] = Rankine('Water',mp = 0.11,th =
      330,n = 60)
22     if a == 1:
23         try :
24             rankine = Rankine(fluid,th = th,profundidad = prof,mp =mp)
25             if matrix_performance[mp][prof].C_T > rankine.C_T :
26                 matrix_performance[mp][prof] = rankine
27         except :
28             pass
29     a = 1
30
31     fluidos_frame = pd.DataFrame(index = matrix_performance.index ,
      columns = matrix_performance.columns)
32     precios_frame = pd.DataFrame(index = matrix_performance.index ,
      columns = matrix_performance.columns)
33     capacidad_frame = pd.DataFrame(index = matrix_performance.index ,
      columns = matrix_performance.columns)
34     ct_frame = pd.DataFrame(index = matrix_performance.index , columns =
      matrix_performance.columns)
35     impacto_ambiental= pd.DataFrame(index = matrix_performance.index ,
      columns = matrix_performance.columns)
36
37     for mp in matrix_performance.columns:
38         for prof in matrix_performance.index:
39             fluidos_frame[mp][prof] = matrix_performance[mp][prof].fluido
40             precios_frame[mp][prof] = np.round(matrix_performance[mp][prof].
      price_kw/1000,2)
41             capacidad_frame[mp][prof] = np.round(matrix_performance[mp][prof].
      Mw,2)
42             ct_frame[mp][prof] = np.round(matrix_performance[mp][prof].C_T/1e6
      ,2)
43             impacto_ambiental[mp][prof] = np.round(matrix_performance[mp][prof
      ].IA/1e3,2)

```

```

44
45
46 fluidos_frame = fluidos_frame.fillna(0)
47 precios_frame = precios_frame.fillna(0)
48 capacidad_frame = capacidad_frame.fillna(0)
49 ct_frame = ct_frame.fillna(0)
50 impacto_ambiental = impacto_ambiental.fillna(0)
51
52 fluidos_frame =fluidos_frame.set_index(np.round(fluidos_frame.index
,3))
53 precios_frame =precios_frame.set_index(np.round(precios_frame.index
,3))
54 capacidad_frame =capacidad_frame.set_index(np.round(capacidad_frame.
index,3))
55 ct_frame =ct_frame.set_index(np.round(ct_frame.index,3))
56 impacto_ambiental =impacto_ambiental.set_index(np.round(
impacto_ambiental.index,3))
57
58 fluids = {'Water':0,'R124':1,'R134a':2,'R22':3}
59
60 plt.figure()
61 f, ax = plt.subplots(figsize=(18,10))
62 hm = sns.heatmap(fluidos_frame.replace(fluids),cmap = colormap, ax=
ax, linewidths=.5, cbar=False,annot =fluidos_frame,annot_kws={"size
": 7},fmt = '')
63 plt.title('Cuenca' + a2.name)
64 plt.xlabel('mp[kg/s]')
65 plt.ylabel('profundidad[km]')
66 # plt.show()
67 plt.savefig(path + '21' + 'Cuenca' + a2.name + '.png')
68
69
70 plt.figure()

```

```

71 f, ax = plt.subplots(figsize=(18,10))
72 hm = sns.heatmap(fluidos_frame.replace(fluids),cmap = colormap, ax=
    ax, linewidths=.5, cbar=False,annot =precios_frame,annot_kws={"size
    ": 7},fmt = '')
73 plt.title('Cuenca ' + a2.name + " $/Kw")
74 plt.xlabel('mp[kg/s]')
75 plt.ylabel('profundidad[km]')
76 # plt.show()
77 plt.savefig(path + '21' + 'Cuenca' + a2.name + "SKw"+ '.png')
78
79 plt.figure()
80 f, ax = plt.subplots(figsize=(18,10))
81 hm = sns.heatmap(fluidos_frame.replace(fluids),cmap = colormap, ax=
    ax, linewidths=.5, cbar=False,annot =capacidad_frame,annot_kws={"
    size": 7},fmt = '')
82 plt.title('Cuenca ' + a2.name + " Mw")
83 plt.xlabel('mp[kg/s]')
84 plt.ylabel('profundidad[km]')
85 # plt.show()
86 plt.savefig(path + '21' + 'Cuenca' + a2.name + "Mw" + '.png')
87
88
89 plt.figure()
90 f, ax = plt.subplots(figsize=(18,10))
91 hm = sns.heatmap(fluidos_frame.replace(fluids),cmap = colormap, ax=
    ax, linewidths=.5, cbar=False,annot =ct_frame,annot_kws={"size":
    7},fmt = '')
92 plt.title('Cuenca ' + a2.name + " Costo total")
93 plt.xlabel('mp[kg/s]')
94 plt.ylabel('profundidad[km]')
95 plt.show()
96 plt.savefig(path + '21' + 'Cuenca' + a2.name + "CT"+'.png')
97

```

```
98 plt.figure()
99 f, ax = plt.subplots(figsize=(18,10))
100 hm = sns.heatmap(fluidos_frame.replace(fluids), cmap = colormap, ax=
    ax, linewidths=.5, cbar=False, annot = impacto_ambiental, annot_kws={"
    size": 7}, fmt = '')
101 plt.title('Cuenca ' + a2.name + " Impacto Ambiental")
102 plt.xlabel('mp[kg/s]')
103 plt.ylabel('profundidad[km]')
104 plt.savefig(path + '21' + 'Cuenca' + a2.name + "IA"+ '.png')
105
106
```