

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL DE TURBINAS A DIESEL EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA EMPRESA REPSOL YPF**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**CHRISTIAN PAUL NOROÑA LUCERO**

[crisuco018@hotmail.com](mailto:crisuco018@hotmail.com)

**DIRECTOR: ING. ORWIELD GUERRERO**

**Quito, Mayo 2012**

## DECLARACIÓN

Yo Christian Paúl Noroña Lucero, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Christian P. Noroña L.

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Christian Paúl Noroña Lucero, bajo nuestra supervisión

Ing. Orwield Guerrero

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

Ing. Jaime Vargas

**COLABORADOR DEL PROYECTO**

Ing. Jorge Escobar

**COLABORADOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme la salud, la tranquilidad y la paciencia para lograr mi objetivo.

A mis padres Nelson y Lupita, por estar siempre a mi lado apoyándome, para permitirme lograr este sueño anhelado. Siendo mi apoyo en todo momento.

A mis hermanos Rolando y Tania, por alentarme en cada instante y estar siempre pendientes de mi.

Al Ing. Orwield Guerrero por su guía, su amistad y su sabiduría para hacer bien las cosas.

Al Ing. Edgar Delgado, por su contribución esencial en este proyecto, por enseñarme muchas cosas dentro del ámbito laboral.

A los Ing. Jorge Escobar y Jaime Vargas por su colaboración en la revisión del presente proyecto, como también por sus conocimientos compartidos, durante mi paso por la Universidad.

Al Ing. José Araujo por sus sugerencias, su constante apoyo para culminar el presente proyecto.

A la empresa REPSOL, en especial al área de ISUP, por abrirme las puertas para desarrollar el proyecto, brindarme su amistad y su experiencia en la vida profesional.

A mi amigos y amigas en general, porque de una u otra forma han apoyado en este nuevo logro, por estar siempre en las buenas y en las malas.

## **DEDICATORIA**

A mi padre Nelson por su sacrificio al darme la educación, por sus consejos sabios que me han hecho mejor persona.

Para mi mamá Lupita al brindarme su cariño y comprensión todos los días de mi existencia, por enseñarme la perseverancia y la constancia.

A mis hermanos, Rolando y Tania los cuales son un ejemplo para mi persona.

A la Familia Noroña que siempre han creído en mi lucha por la superación profesional.

Para mi abuelita Judith Andrade, pese a que no se encuentre con nosotros, se que desde el cielo va a estar muy orgullosa.

## CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
CONTENIDO.....	v
LISTA DE ANEXOS.....	x
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xvii
PRESENTACIÓN.....	xviii
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>FUNDAMENTO TEÓRICO .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 REPSOL .....	1
1.2.1 FUNCIONAMIENTO DE LA ESTACIÓN DE DESHIDRATACIÓN NPF .....	2
1.2.2 GENERACIÓN ELECTRICA ESTACIÓN DE DESHIDRATACIÓN NPF .....	2
1.3 CONCEPTOS BÁSICOS .....	4
1.3.1 COGENERACIÓN .....	4
1.3.2 CALOR.....	4
1.3.3 VAPOR .....	4
1.3.3.1 TIPOS DE VAPOR .....	4
1.3.3.1.1 Vapor Saturado .....	5
1.3.3.1.2 Vapor Sobrecalentado .....	5
1.3.4 BALANCE DE ENERGÍA .....	5
1.3.5 INTERCAMBIADOR DE CALOR .....	6
1.3.5.1 Tipos de Intercambiadores de calor según su operación. ....	6
1.3.5.1.1 Flujo Paralelo .....	6
1.3.5.1.2 Contraflujo.....	7
1.3.5.1.3 Flujo Cruzado.....	8

1.3.6 DIFERENCIA MEDIA LOGARÍTMICA DE TEMPERATURAS (LMTD) .....	8
1.4 CICLOS TERMODINÁMICOS DE POTENCIA .....	9
1.4.1 CICLO DE CARNOT GENÉRICO.....	9
1.4.2 CICLO DE RANKINE.....	11
1.4.3 CICLO DE RANKINE ORGÁNICO.....	11
1.5 CICLO RANKINE ORGÁNICO (ORC) .....	12
1.5.1 CARACTERÍSTICAS DEL CICLO RANKINE ORGÁNICO (ORC)..	12
1.5.2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO .....	13
1.5.3 ECUACIONES DEL CICLO RANKINE ORGÁNICO .....	16
1.5.3.1 Proceso en la Bomba .....	16
1.5.3.2 Proceso en el Evaporador .....	17
1.5.3.3 Proceso en la Turbina.....	17
1.5.3.4 Proceso en el Condensador .....	18
1.5.3.5 Eficiencia del ORC.....	18
1.5.4 FLUIDOS APTOS PARA EL ORC .....	19
1.5.4.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN FORMA DOMO DIAGRAMA T VS S	19
1.6 CONDICIONES DEL LUGAR .....	21
1.7 CONCEPTOS BÁSICOS DE INGENIERÍA ECONÓMICA.....	22
1.7.1 VALOR DE DINERO EN EL TIEMPO .....	22
1.7.2 INTERÉS .....	22
1.7.3 TASA DE INTERÉS .....	22
1.7.4 EQUIVALENCIA ECONÓMICA .....	23
1.7.5 INTERÉS SIMPLE .....	23
1.7.6 INTERÉS COMPUESTO .....	23
1.7.7 TASA DE RETORNO (TR).....	23
1.7.8 TASA MÍNIMA ATRACTIVA DE RETORNO (TMAR) .....	23
1.7.9 VALOR ACTUAL NETO DE LA INVERSIÓN (VAN) .....	24
1.7.10 TIR .....	24
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>25</b>
<b>DESCRIPCIÓN ACTUAL DEL CIRCUITO DE ACEITE TÉRMICO .....</b>	<b>25</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	25
2.2 ELEMENTOS DEL PROCESO .....	25
2.2.1 TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ACEITE T-1075 .....	25

2.2.2 BOMBA DE TRANSFERENCIA P-1076 .....	26
2.2.3 TANQUE DE EXPANSIÓN V-1070.....	26
2.2.4 BOMBAS DE CIRCULACIÓN P-1071 A/B/C .....	27
2.2.5 INTERCAMBIADORES/RECUPERADORES DE CALOR, H-1072 A/B.....	28
2.2.6 TURBINAS GE LM2500, G-1170.....	29
2.2.7 INTERCAMBIADORES DE CALOR .....	30
2.2.7.1 Intercambiador de Calor E-1160.....	30
2.2.7.2 Intercambiadores de Calor E-1104 Y E-1204 .....	31
2.2.8 CARACTERÍSTICAS DEL ACEITE TÉRMICO .....	32
2.3 ESQUEMA DEL PROCESO ACTUAL DE RECUPERACIÓN DE CALOR .....	32
2.4 DATOS DEL PROCESO ACTUAL DE RECUPERACIÓN DE CALOR...	33
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>36</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN DE CICLO RANKINE ORGÁNICO EN EL SISTEMA DE RECUPERACIÓN CALOR .....</b>	<b>36</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	36
3.2 BALANCE DE PLANTA .....	36
3.3 FOCO DE CALOR .....	37
3.4 ELECCIÓN DEL FLUIDO DE TRABAJO.....	37
3.5 CONFIGURACIÓN SELECCIONADA .....	39
3.6 ESQUEMA DEL CICLO .....	40
3.6.1 ESQUEMA PROPUESTO POR REPSOL .....	40
3.6.2 CONFIGURACIÓN DEL CICLO RANKINE ORGÁNICO .....	41
3.7 MODELO MATEMÁTICO .....	43
3.7.1 ECUACIONES DEL MODELO.....	43
3.7.2 PUNTO DE DISEÑO.....	44
3.8 CÁLCULOS EN EL CICLO RANKINE ORGÁNICO.....	49
3.8.1 RECUPERADOR (EVAPORADOR) .....	49
3.8.2 TURBINA .....	52
3.8.3 PRE- CALENTADOR (REGENERADOR).....	53
3.8.4 BOMBA DEL ORC .....	56
3.8.5 CIRCUITO DE CONDENSACIÓN .....	57
3.8.5.1 Condensador .....	57



3.8.5.2 Bomba del Circuito de Condensación.....	59
3.8.5.3 Chiller .....	59
3.8.6 TRABAJO NETO DEL CICLO.....	59
3.8.7 CÁLCULO DE LMTD .....	61
3.8.7.1 Pre-calentador (Regenerador).....	61
3.8.7.2 Recuperador (Evaporador) .....	61
3.8.7.3 Condensador .....	62
3.8.8 RESUMEN POTENCIA DE CADA ELEMENTO DEL ORC .....	62
3.9 OPERACIÓN .....	63
3.9.1 MANEJO DEL ACEITE TÉRMICO.....	63
3.9.2 MANEJO DENTRO DEL CICLO RANKINE ORGÁNICO.....	64
3.9.3 MANEJO DEL CIRCUITO DE CONDENSACIÓN.....	65
3.10 PÉRDIDAS DE CARGA.....	65
3.11 REDUCCIÓN DE EMISIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN.....	66
3.11.1 CONSIDERACIONES PREVIAS AL ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE CO <sub>2</sub> .....	66
3.11.2 CANTIDAD TOTAL DE CONSUMO DE DIESEL Y EMISIONES DE CO <sub>2</sub> EN NPF .....	66
3.11.3 DATOS ENCONTRADOS Y PROPIEDADES DEL DIESEL .....	68
3.11.4 CÁLCULO DE REDUCCIÓN EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....	69
3.11.4.1 Escenario de emisiones sin el Proyecto ORC .....	69
3.11.4.2 Reducción de emisiones con la implementación del ORC .....	69
3.11.4.3 Ahorro de diesel.....	70
3.11.4.4 Ahorro de Crudo .....	71
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>72</b>
<b>ESTUDIO ECONÓMICO DEL MODELO .....</b>	<b>72</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	72
4.2 MODELO ECONÓMICO .....	72
4.3 ANALISIS ECONÓMICO .....	73
4.4 COSTOS DEL PROYECTO.....	73
4.4.1 COSTOS DIRECTOS EN EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN.....	73
4.4.2 COSTOS MANO DE OBRA DIRECTA E INDIRECTA.....	74
4.5 EGRESOS .....	75
4.5.1 COSTOS OPERATIVOS.....	75

4.6 VALOR DE SALVAMENTO .....	76
4.7 INGRESOS (I) .....	76
4.8 ANÁLISIS FINANCIERO.....	77
4.8.1 FLUJO DE CAJA .....	77
4.8.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE EFECTIVOS .....	77
4.8.3 DIAGRAMA DE FLUJO DE CAJA EN EXCEL.....	79
4.8.4 VALOR NETO ACTUAL.....	79
4.8.5 TASA DE INTERES DE RETORNO (TIR) .....	80
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>82</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA.....</b>	<b>82</b>
5.1 INTRODUCCIÓN.....	82
5.2 RESULTADOS TÉCNICOS .....	82
5.2.1 PUNTO NOMINAL O PUNTO DE DISEÑO .....	82
5.2.2 RESULTADOS OBTENIDOS RESPECTO AL CONSUMO DE DIESEL Y CRUDO .....	85
5.2.3 DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	86
5.2.4 RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE EMISIONES DE CO2.....	87
5.3 RESULTADOS ECONÓMICOS.....	88
5.3.1 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD .....	88
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>90</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>90</b>
6.1 CONCLUSIONES .....	90
6.2 RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS .....	92
PLANOS .....	109

## LISTA DE ANEXOS

### ANEXO A

*A.1.- CÁLCULO PARA FLUJO MÁSSICO*

### ANEXO B

*B.1.- PROPIEDADES FÍSICAS DEL ISOPENTANO*

*B.2.- PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL ISOPENTANO*

### ANEXO C

*C.1.- PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS DEL ACEITE TÉRMICO  
EN EL SISTEMA*

*C.2.- DATOS DE SEGURIDAD DEL ACEITE TÉRMICO*

### ANEXO D

*D.1.- SIMULACIÓN EN HYSYS*

*D.2.- DATOS DE LA SIMULACIÓN EN HYSYS*

## LISTA DE TABLAS

<i>TABLA 1. 1 Usos de la Energía en NPF .....</i>	<i>3</i>
<i>TABLA 1. 2 Equipos de generación eléctrica en NPF.....</i>	<i>3</i>
<i>TABLA 1. 3 Puntos que intervienen en el ORC.....</i>	<i>14</i>
<i>TABLA 1. 4 Temperatura Ambiente .....</i>	<i>22</i>
<i>TABLA 1. 5 Presión Barométrica.....</i>	<i>22</i>
<i>TABLA 2. 1 Características del Recuperador de Calor .....</i>	<i>29</i>
<i>TABLA 2. 2 Temperatura, Presión y Caudal de los Intercambiadores de Calor del aceite térmico.....</i>	<i>34</i>
<i>TABLA 3. 1 Porcentaje de gases de escape que calientan al aceite térmico... 37</i>	
<i>TABLA 3. 2 Propiedades del Fluido Orgánico a utilizarse en el Ciclo Rankine Orgánico.....</i>	<i>38</i>
<i>TABLA 3. 3 Datos tomados dentro del Ciclo Rankine Orgánico (simulación Hysys) .....</i>	<i>46</i>
<i>TABLA 3. 4 Conversión de unidades .....</i>	<i>46</i>
<i>TABLA 3. 5 Temperatura de Saturación del Isopentano en las Presiones Medidas.....</i>	<i>47</i>
<i>TABLA 3. 6 Fases y valores de Temperaturas y Presiones en cada punto .....</i>	<i>48</i>
<i>TABLA 3. 7 Resultados de las Potencias de cada equipo en ORC y Circuito de Condensación. Flujo másico de cada líquido de Trabajo .....</i>	<i>62</i>
<i>TABLA 3. 8 Máximo trabajo posible de los Recuperadores .....</i>	<i>66</i>

<i>TABLA 4. 1 Lista de Precios de equipos del Ciclo Rankine Orgánico y Circuito de Condensación, (ANEXO) .....</i>	<i>73</i>
<i>TABLA 4. 2 Costos de Instrumentación (Tomados de base de datos SIGIN, REPSOL).....</i>	<i>74</i>
<i>TABLA 4. 3 Costos Mano de Obra Directa e Indirecta .....</i>	<i>75</i>
<i>TABLA 4. 4 Costos Operativos, para vida útil de 6 años.....</i>	<i>76</i>
<i>TABLA 5. 1 Presión, temperatura y entalpía de los puntos de diseño .....</i>	<i>83</i>
<i>TABLA 5. 2 Resumen de resultados de Intercambiadores.....</i>	<i>84</i>
<i>TABLA 5. 3 Resultados de las reducciones de Diesel y Crudo.....</i>	<i>85</i>
<i>TABLA 5. 4 Resultados de Inversión, VAN y TIR.....</i>	<i>88</i>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. 1 Estaciones de Deshidratación y Plataformas del Bloque 16.....	1
FIGURA 1. 2 Diagrama T-V.....	5
FIGURA 1. 3 Esquema de un intercambiador de calor primitivo ( $T_1$ ; fluido frio, $t_2$ fluido caliente).....	6
FIGURA 1. 4 Ejemplo Intercambiador de Flujo Paralelo .....	7
FIGURA 1. 5 Ejemplo de Intercambiador de Contraflujo.....	7
FIGURA 1. 6 Ejemplo de Intercambiador de Flujo Cruzado.....	8
FIGURA 1. 7 Máquina Térmica de Carnot .....	9
FIGURA 1. 8 Diagrama P-V ciclo Carnot .....	10
FIGURA 1. 9 Diagrama T-S ciclo Carnot.....	10
FIGURA 1. 10 Diagrama del Ciclo Rankine.....	11
FIGURA 1. 11 Diagrama ciclo ORC simplificado.....	12
FIGURA 1. 12 Diagrama T vs S; del Ciclo Rankine Orgánico.....	14
FIGURA 1. 13 Configuración simple del ORC.....	16
FIGURA 1. 14 Comparación de diagramas T-s para fluidos a: isoentrópicos, b: húmedos, c: secos en un ciclo ideal con expansión isoentrópica.....	21
FIGURA 2. 1 Tanque de almacenamiento de aceite térmico .....	25
FIGURA 2. 2 Bomba de Transferencia P-1076 .....	26
FIGURA 2. 3 Tanque de Expansión V-1070 .....	26
FIGURA 2. 4 Bombas de Circulación.....	27
FIGURA 2. 5 Intercambiador/Recuperador de calor A y B en NPF.....	28

<i>FIGURA 2. 6 TURBINAS GE LM2500.....</i>	<i>29</i>
<i>FIGURA 2. 7 Intercambiador de Calor E-1160.....</i>	<i>30</i>
<i>FIGURA 2. 8 Parte interna del intercambiador de calor.....</i>	<i>30</i>
<i>FIGURA 2. 9 Intercambiadores de calor E-1104 y E-1204.....</i>	<i>31</i>
<i>FIGURA 2. 10 Circuito de aceite térmico.....</i>	<i>33</i>
<i>FIGURA 2. 11 Datos circuito de aceite térmico.....</i>	<i>35</i>
<i>FIGURA 3. 1 Fórmula desarrollada del Isopentano.....</i>	<i>39</i>
<i>FIGURA 3. 2 Esquema sugerido por REPSOL.....</i>	<i>40</i>
<i>FIGURA 3. 3 Esquema del Proceso propuesto en NPF.....</i>	<i>41</i>
<i>FIGURA 3. 4 Configuración del ORC.....</i>	<i>42</i>
<i>FIGURA 3. 5 Circuito de Aceite Térmico, Ciclo Rankine Orgánico y Circuito de Condensación, Simulado en HYSYS 7.2.....</i>	<i>45</i>
<i>FIGURA 3. 6 Diagrama T vs S del Isopentano, ORC.....</i>	<i>48</i>
<i>FIGURA 3. 7 Recuperador.....</i>	<i>49</i>
<i>FIGURA 3. 8 Turbina.....</i>	<i>52</i>
<i>FIGURA 3. 9 Regenerador.....</i>	<i>54</i>
<i>FIGURA 3. 10 Regenerador.....</i>	<i>56</i>
<i>FIGURA 3. 11 Regenerador.....</i>	<i>57</i>
<i>FIGURA 3. 12 Consumo de Diesel por cada Mw en NPF en el 2011.....</i>	<i>67</i>
<i>FIGURA 3. 13 Esquema Sintetizado del proceso de la Planta Topping.....</i>	<i>68</i>
<i>FIGURA 4. 1 Diagrama de Flujo de Caja.....</i>	<i>78</i>
<i>FIGURA 5. 1 Ciclo de Potencia sobre el Diagrama T vs S.....</i>	<i>82</i>

<i>FIGURA 5. 2 Esquema final a implementarse sobre el Circuito de Aceite Térmico .....</i>	<i>83</i>
<i>FIGURA 5. 3 Comparación de Consumo de Diesel antes y después de la implementación del Ciclo Rankine Orgánico. ....</i>	<i>85</i>
<i>FIGURA 5. 4 Comparación de Consumo de Crudo antes y después de la implementación del Ciclo Rankine Orgánico. ....</i>	<i>86</i>
<i>FIGURA 5. 5 Demanda de Energía eléctrica en el Bloque 16, simulando implementación del ORC. ....</i>	<i>87</i>



## SIMBOLOGÍA

<b>T</b>	Temperatura, °C o K
<b><math>\dot{W}</math></b>	Potencia, Kw o Mw
<b>P</b>	Presión, Kpa o Mpa
<b>h</b>	Entalpía Específica, KJ/Kg
<b><math>\dot{m}</math></b>	Flujo Másico, Kg/s
<b>v</b>	Volumen Específico, m <sup>3</sup> /Kg
<b><math>\dot{Q}</math></b>	Tasa de Transferencia de Calor, Kw
<b>A</b>	Área, m <sup>2</sup>
<b><math>C_p</math></b>	Calor Específico, KJ/Kg.K
<b>C</b>	Capacitancia Térmica, °C o K
<b><math>C_r</math></b>	Relación de Capacidad de Calor
<b><i>NUT</i></b>	Número de Unidades de Transferencia
<b>U</b>	Coeficiente Global de Transferencia de Calor

### Letras Griegas

<b><math>\emptyset</math></b>	Diámetro, pulg
<b><math>\delta</math></b>	Densidad, Kg/m <sup>3</sup>
<b><math>\eta</math></b>	Eficiencia Térmica

### Sub índices

<b><i>rec</i></b>	Recuperador (evaporador)
<b><i>reg</i></b>	Regenerador (Pre-Calentador)
<b><i>cond</i></b>	Condensador
<b><i>turb</i></b>	Turbina
<b><i>iso</i></b>	Isopentano
<b><i>ea</i></b>	Entrada de agua
<b><i>sa</i></b>	Salida de Agua
<b><i>B</i></b>	Bomba
<b><i>reg;a</i></b>	Regenerador lado de alta Presión
<b><i>reg;b</i></b>	Regenerador lado de baja Presión
<b><i>sat</i></b>	Saturado
<b><i>aceite t</i></b>	Aceite Térmico
<b><i>In,iso,rec</i></b>	Entrada del Isopentano al Recuperador

## RESUMEN

En la industria petrolera las plantas de procesamiento de crudo tienen un elevado potencial para la generación eléctrica a partir de los calores residuales (gases de combustión) del proceso. El cual puede parcialmente cubrir la demanda de energía eléctrica al convertirlo a través de un ciclo de Rankine Orgánico (ORC), constituyéndola así en una planta de cogeneración.

Desde el punto de vista tecnológico dicho ciclo presenta características específicas y diferenciadas con respecto al ciclo de Rankine Normal, puesto que utiliza equipos más compactos, permitiendo suprimir algunos elementos.

En este trabajo se analiza la viabilidad técnica y económica para la recuperación de calor residual de turbinas a diesel en la generación de energía eléctrica en la empresa REPSOL.

En la Estación de Deshidratación del Norte (NPF) para poder realizar la separación del crudo, se debe incrementar la temperatura del mismo, y esto se da mediante la ayuda del aceite térmico que recupera calor desde los gases de escape de las Turbina GE LM2500. El proyecto trata de aprovechar el poder calorífico entregado de los gases de escape hacia el aceite térmico, y de ésta manera evaporar un fluido orgánico para producir rotación en una turbina y por lo tanto generar energía eléctrica.

Se especifican los datos de la empresa, sus requerimientos y el marco teórico, necesarios para poder entender y fundamentar el proyecto. Como también se aclara las condiciones climáticas y situación geográfica.

Se realiza un estudio previo para la selección del fluido más apto para que circule en el ciclo a implementarse. Mediante la simulación en HYSYS 7.2 se trata de obtener el mayor potencial de poder calorífico de los gases de escape y con ello determinar valores que brinda con la configuración seleccionada.

Finalmente se detalla un estudio económico respecto al ahorro de diesel al implementar el proyecto durante un periodo de vida de 6 años versus la inversión inicial, en la adquisición de equipos, instrumentación, mano de obra etc. Para determinar si el proyecto es rentable.

## PRESENTACIÓN

En la actual situación energética a nivel mundial, el ahorro en el consumo energético y mejoras en la eficiencia de energía están entre los objetivos importantes para el cambio hacia un mundo más sostenible, el cual recae en su mayoría en el sector industrial el mismo que debe apoyar en la búsqueda de soluciones adecuadas.

Por ello se ha realizado un estudio y se observa que en los equipos ubicados en el Bloque 16 – NPF es posible implementar un sistema de aprovechamiento de la energía residual de gases de combustión que emanan los siguientes equipos:

- Turbina GE, LM 2500, G-1170 A
- Turbina GE, LM 2500, G-1170 B

Los gases de combustión son las fuentes de calor de un circuito de aceite térmico, el aceite térmico a su vez se utilizará para calentar y evaporar un fluido de trabajo convirtiendo en un Ciclo Rankine Orgánico, generando movimiento en una turbina; el objetivo de ésta acción es recuperar energía calórica y transformarla en energía eléctrica.

La generación eléctrica del Bloque 16 se basa en la quema de combustibles. La energía eléctrica generada en éste sistema de recuperación de calor permitirá reducir la cantidad de combustible requerido para la generación y las emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera.

# CAPÍTULO 1

## FUNDAMENTO TEÓRICO

### 1.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se especifican los datos de la empresa, sus requerimientos y el marco teórico que se necesita para entender y fundamentar el proyecto.

### 1.2 REPSOL

El Bloque 16 operado por Repsol se encuentra en la región Amazónica, Provincia de Orellana, donde se hallan ubicadas dos estaciones de deshidratación que son: North Petroleum Facilities (NPF) y la otra en el South Petroleum Facilities (SPF). En la parte del Sur (SPF) ingresa los pozos de producción de Ginta, Iro, Daimi y Amo; mientras que en la parte del norte (NPF) la producción proviene de los pozos de Capirón, Bogi y Tivacuno. Ver Figura 1.1.

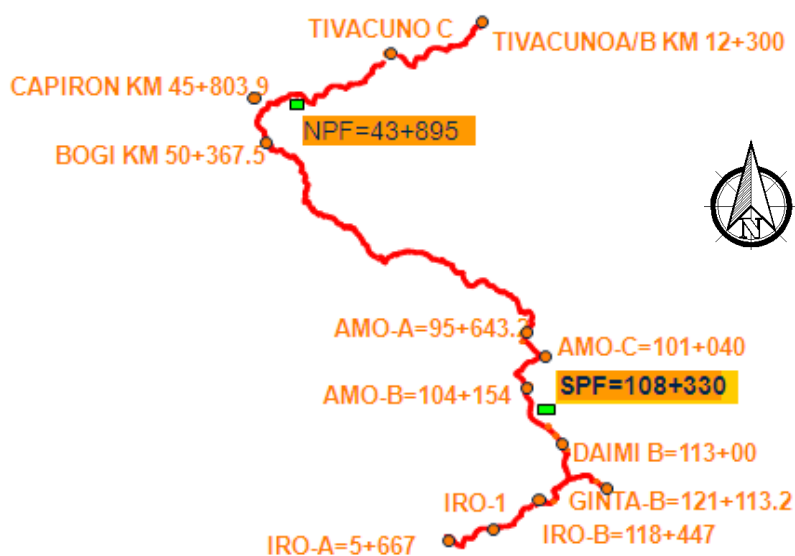


FIGURA 1. 1 Estaciones de Deshidratación y Plataformas del Bloque 16

Fuente: (1)

(1) Data ROOM. **REPSOL**. Quito: s.n.,1998

### **1.2.1 FUNCIONAMIENTO DE LA ESTACIÓN DE DESHIDRATACIÓN NPF**

El fluido de los pozos de producción (crudo, agua, gas) ingresa a la estación de tratamiento en NPF a través de los recibidores y posteriormente, mediante un manifold se envía el fluido hacia el tren A o tren B, cada tren de proceso consta de: separador de agua libre (FWK.O.), intercambiador de calor, separador de producción y deshidratador electrostático.

Los cuales son cada uno de los equipos por donde pasa el crudo, desde el momento de su extracción hasta el momento de enviar a la refinería, con estos equipos se logra separar el crudo, el líquido y el gas. Para enviarlos a distintos destinos, y su respectiva utilización.

Además de ello se realiza el tratamiento químico del fluido para controlar emulsiones, corrosión, lo que permite transferirlo en condiciones estables hasta la estación de deshidratación, con ello también se logra evitar en lo que se pueda la corrosión de las tuberías.

Las líneas de transferencia de fluido cuentan con dispositivos de control instalados en los lanzadores, recibidores y en los cruces de ríos, para reducir el impacto ambiental en caso de posibles derrames por rotura de líneas. Estos se los conoce como válvulas check y válvulas SDV.

La estación de deshidratación NPF posee un sistema de recuperación de calor para el aceite térmico, en éste sistema se va a enfocar el proyecto. Es de fundamental importancia conocer el sistema, que ayuda a calentar al crudo por medio de los intercambiadores de calor; en el cual existe una transferencia de calor entre el crudo que se encuentra frío en comparación con el aceite que se lo calienta por medio del sistema mencionado.

### **1.2.2 GENERACIÓN ELECTRICA ESTACIÓN DE DESHIDRATACIÓN NPF**

El Bloque 16 operado por Repsol tiene una autogeneración de energía eléctrica dentro de sus instalaciones, que se distribuyen para el área de procesos haciendo uso de la energía de la manera que se representa en la Tabla 1.1:

TABLA 1. 1 Usos de la Energía en NPF

<b>Tratamiento de Fluidos</b>	Separadores de Agua Libre
	Separador de Producción
	Deshidratadores Electroestáticos
<b>Transporte de Crudo</b>	Bombas de Transferencia
<b>Transporte de Agua</b>	Bombas Booster
	Bombas de media presión
<b>Procesos</b>	Sistemas de control
<b>Sistema Contraincendios</b>	Bombas Jockey
<b>Campamentos</b>	Iluminación y alumbrado
	Aire acondicionado
	Recreación
	Catering
<b>Servicios Auxiliares</b>	Comunicaciones
	Compresores

Para auto abastecer la demanda de energía eléctrica en NPF, debido a la situación geográfica se tiene diferentes formas de generación, para ello se explica la distribución en la Tabla 1.2:

TABLA 1. 2 Equipos de generación eléctrica en NPF

<b>Cantidad</b>	<b>Equipos</b>	<b>Capacidad de Generación (c/u)</b>	<b>Combustible</b>
2	Turbinas LM 2500	26 MW	Diesel
7	Waukesha	0.9 MW	Gas
1	Detroit	1 MW	Diesel

Como el sistema de cableado eléctrico se encuentra interconectado entre NPF y SPF, se distribuye aproximadamente unos 10 MW desde NPF hacia SPF.

Como se puede observar en la Tabla 1.2 se obtiene mayor parte de energía eléctrica a partir de diesel.

## **1.3 CONCEPTOS BÁSICOS**

### **1.3.1 COGENERACIÓN**

La cogeneración consiste en generar electricidad, por medio de la quema de combustibles, aprovechando el máximo calor residual como energía térmica, la que tendrá un uso útil (calefacción, calentamiento de agua, procesos que requieran calor, etc.) y de ésta forma se aumenta la eficiencia del generador y del combustible. Prácticamente la cogeneración a partir de una fuente primaria produce energía eléctrica y energía térmica, simultáneamente.

### **1.3.2 CALOR**

El calor está definido como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o entre un sistema y sus alrededores) debido a una diferencia de temperatura. (2)

### **1.3.3 VAPOR**

Es el estado físico donde las moléculas se mueven al azar y apartadas unas de otras por tanto no hay orden molecular, ésta fase tiene un nivel de energía considerablemente mayor que en las fases líquidas y sólidas, es decir el gas debe liberar una gran cantidad de energía antes que pueda condensarse o congelarse.

#### **1.3.3.1 TIPOS DE VAPOR**

El vapor se clasifica de acuerdo a su estado de energía o a su grado de temperatura y presión al que se somete.

En la Figura 1.2 se aprecia inicialmente tres regiones: la región de líquido comprimido, que es la región a la izquierda de la campana, la región de vapor sobrecalentado que es la región de la derecha de la campana y la región del líquido más vapor saturado aquella que se halla dentro de la campana.

---

(2) **Cengel Y.- Boles M.**, *TERMODINAMICA*, s.l.: Mc Graw Hill, 2009.

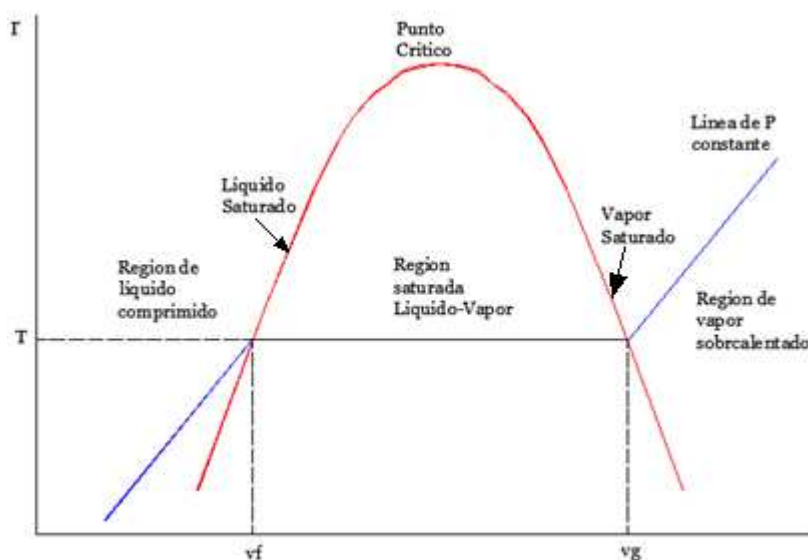


FIGURA 1. 2 Diagrama T-V

**Fuente:** Propia

#### 1.3.3.1.1 Vapor Saturado

El vapor que está a punto de condensarse se conoce como *vapor saturado*. En este estado de saturación está compuesto tanto de agua en la fase líquida como de agua en la fase gaseosa. Fuente (3)

El vapor generado por una caldera es fundamentalmente vapor saturado. Éste tiene propiedades que lo permiten actuar como fuente de calor y por lo tanto es muy utilizado ampliamente entre los 100°C y 200° C

#### 1.3.3.1.2 Vapor Sobrecalentado

Un vapor que no está a punto de condensarse (es decir, no es vapor saturado). Se le denomina vapor sobrecalentado. Fuente (3)

### 1.3.4 BALANCE DE ENERGÍA

El aumento o disminución en la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía que sale del sistema durante el proceso.

---

(3) Cengel Y., Boles M. Termodinámica, Mc Graw Hill, 2009.



$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad \text{Ec.1. 1}$$

### 1.3.5 INTERCAMBIADOR DE CALOR

Es un dispositivo de transferencia de calor que se utiliza para transferir energía térmica entre dos o más líquidos a diferentes temperaturas. En la mayoría de los intercambiadores de calor, los fluidos están separados por una superficie de transferencia de calor. Ver Figura 1.3.



FIGURA 1. 3 Esquema de un intercambiador de calor primitivo (T1; fluido frío, t2 fluido caliente)

**Fuente:** Propia

Las funciones principales de un intercambiador de calor son:

- Calentar un fluido frío mediante un fluido con mayor temperatura.
- Reducir la temperatura de un fluido mediante un fluido con menor temperatura.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mediante un fluido con mayor temperatura.
- Condensar un fluido en estado gaseoso por medio de un fluido frío.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mientras se condensa un fluido gaseoso con mayor temperatura.

#### 1.3.5.1 Tipos de Intercambiadores de Calor según su Operación.

##### 1.3.5.1.1 Flujo Paralelo

Existe flujo paralelo cuando el flujo interno o de los tubos y el flujo externo o de la carcasa ambos fluyen a la misma dirección, en este caso ambos fluidos

ingresan al intercambiador por el mismo extremo y estos presentan una diferencia de temperatura significativa. Ver Figura 1.4.

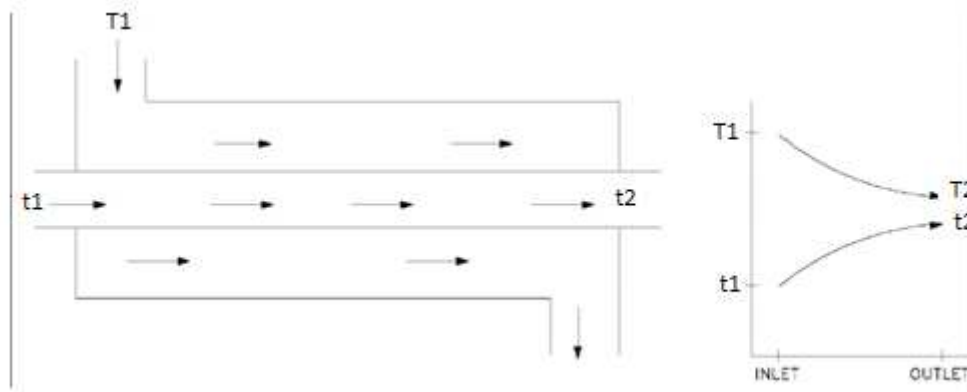


FIGURA 1. 4 Ejemplo Intercambiador de Flujo Paralelo

**Fuente: (2)**

#### 1.3.5.1.2 Contraflujo

Es cuando los dos fluidos fluyen en sentido opuesto. Cada de ellos entra al intercambiador por diferentes extremos. Este tipo de intercambiador resulta ser más eficiente, ya que puede presentar la temperatura más alta en el foco frío y la más baja temperatura en el foco caliente. Ver Figura 1.5.

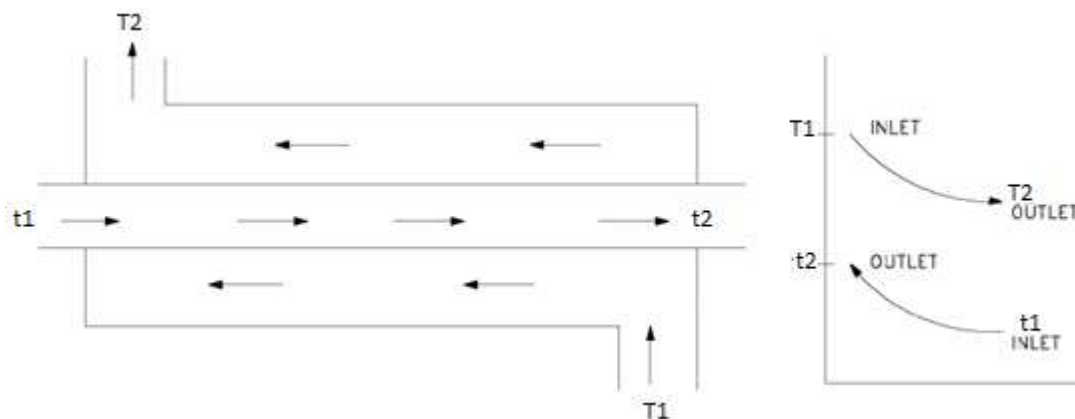


FIGURA 1. 5 Ejemplo de Intercambiador de Contraflujo

**Fuente: (2)**

### 1.3.5.1.3 Flujo Cruzado

Es cuando uno de los fluidos fluye de manera perpendicular respecto al otro, esto es, uno de ellos pasa a través de tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90°. Estos intercambiadores son comúnmente usados donde uno de ellos presenta cambio de fase y por tanto se tiene un fluido pasado por el intercambiador de calor de dos fases. Ver Figura 1.6.

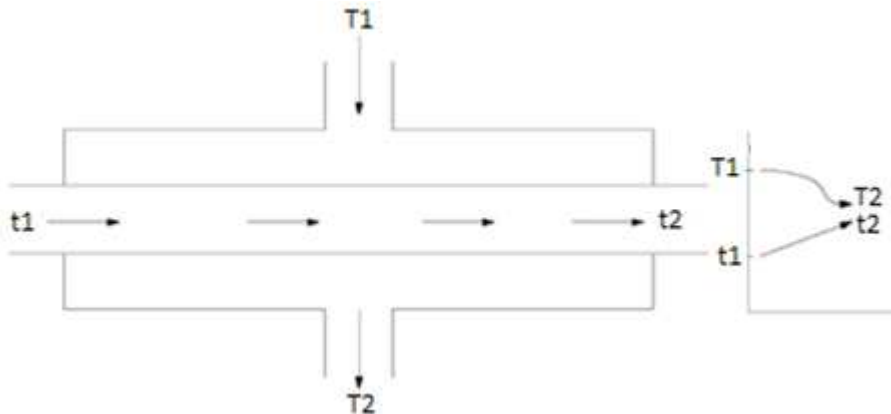


FIGURA 1. 6 Ejemplo de Intercambiador de Flujo Cruzado

**Fuente:** (2)

### 1.3.6 DIFERENCIA MEDIA LOGARÍTMICAS DE TEMPERATURAS (LMTD)

Para los tres arreglos básicos simples indicados en la anteriormente es las ecuaciones de LMTD, se reducen a las siguientes:

- Para el intercambiador de flujo paralelo, donde los fluidos fluyen en sentidos iguales a través del intercambiador.

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \left[ \frac{(T_1 - t_1)}{(T_2 - t_2)} \right]} \quad \text{Ec.1. 2}$$

- Para el intercambiador de contraflujo, donde los fluidos fluyen en sentidos contrarios a través del intercambiador.

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left[ \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)} \right]} \quad \text{Ec.1.3}$$

## 1.4 CICLOS TERMODINÁMICOS DE POTENCIA.

Los dispositivos y sistemas usados para producir una salida neta de trabajo son llamados motores y los ciclos termodinámicos en que operan se denominan ciclos de potencia.

Dentro de los ciclos de potencia se diferencia dos tipos:

- Ciclos de gas: el fluido de trabajo permanece en fase gaseosa en todo el ciclo.
- Ciclos de vapor: el fluido de trabajo se evapora y condensa alternadamente.

### 1.4.1 CICLO DE CARNOT GENÉRICO.

La eficiencia térmica de un ciclo de potencia alcanza su nivel máximo si todo el calor que se obtiene de las fuentes de energía ocurre a la máxima temperatura posible; es decir, un ciclo alcanzará su máximo rendimiento cuando sus temperaturas medias de admisión y cesión de calor coincidan respectivamente con las temperaturas de los focos caliente y frío que alimentan el ciclo. Ver Figura 1.7.

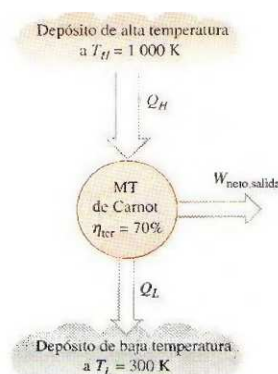


FIGURA 1.7 Máquina Térmica de Carnot

Fuente: (3)

Una máquina térmica que realiza este ciclo se denomina máquina de Carnot. Trabaja absorbiendo una cantidad de calor  $Q_1$  de la fuente de alta temperatura y cede un calor  $Q_2$  a la de baja temperatura produciendo un trabajo sobre el exterior. Al ser reversible, el rendimiento puede definirse en función de las temperaturas de los focos:

$$\eta_t = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{Ec.1. 4}$$

El ciclo de Carnot, consta de cuatro etapas: dos procesos isoterms y dos adiabáticos (aislados térmicamente). Y que es posible llevar a cabo a través de un sistema cerrado o flujo estacionario. En las Figuras 1.8 y 1.9 se indica el proceso tanto P vs v; como T vs S, respectivamente.

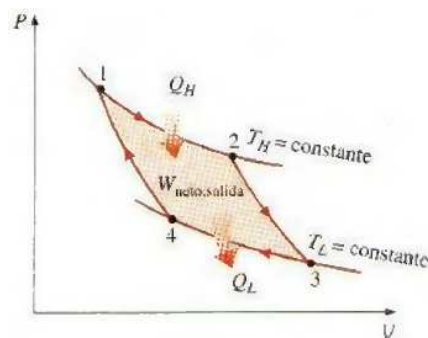


FIGURA 1. 8 Diagrama P-V ciclo Carnot

Fuente: (3)

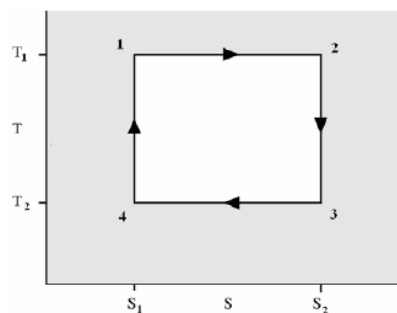


FIGURA 1. 9 Diagrama T-S ciclo Carnot

Fuente: (3)

### 1.4.2 CICLO DE RANKINE.

Muchas de las dificultades tecnológicas que presenta la implantación del ciclo de Carnot pueden eliminarse si el vapor es sobrecalentado en la caldera y se condensa por completo en el condensador, como se muestra de manera esquemática en el diagrama T-s de la Figura 1.10. El ciclo que resulta es el ciclo Rankine. Éste ciclo no incluye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto por los siguientes cuatro procesos, como se aprecia en la Figura 1.10:

1→2 Compresión isentrópica en una bomba.

2→3 Adición de calor a presión constante en una caldera.

3→4 Expansión isentrópica en una turbina.

4→1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.

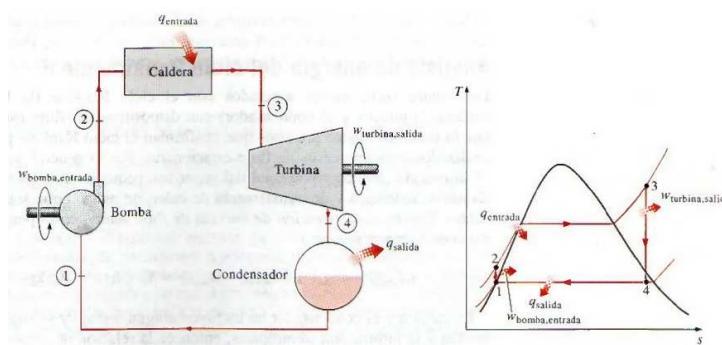


FIGURA 1. 10 Diagrama del Ciclo Rankine

Fuente: (3)

### 1.4.3 CICLO DE RANKINE ORGÁNICO.

El creciente interés en la extracción de energía mecánica a partir de fuentes de baja temperatura ha provocado que se hayan desarrollado numerosas técnicas de conversión. Una de las más prometedoras es el ciclo de Rankine Orgánico (ORC).

(3) Cengel Y.- Boles M., *TERMODINÁMICA*, Mc Graw Hill, 2009, Capítulo 10, pág. 303

El esquema de funcionamiento de un ORC es idéntico al de un ciclo de Rankine tradicional, conteniendo una bomba, una caldera (intercambiador de calor), una turbina y un condensador. La diferencia fundamental es la sustitución del agua por un fluido orgánico con propiedades de volatilidad superiores al agua como fluido de trabajo. El uso de fluidos orgánicos posibilita el uso de focos de calor de temperaturas inferiores. Además, cada fluido tiene una forma de campana diferente, por lo que el fluido de trabajo será un variable que repercute en el rendimiento del ciclo (4).

## 1.5 CICLO RANKINE ORGÁNICO (ORC)

### 1.5.1 CARACTERÍSTICAS DEL CICLO RANKINE ORGÁNICO (ORC)

Desde un punto de vista tecnológico los ciclos ORC presentan características específicas y diferenciadas respecto al ciclo de Rankine convencional, resaltando la posibilidad de condensar por encima de la presión atmosférica con medios típicos de enfriamiento, presión crítica reducida. Ver Figura 1.11.

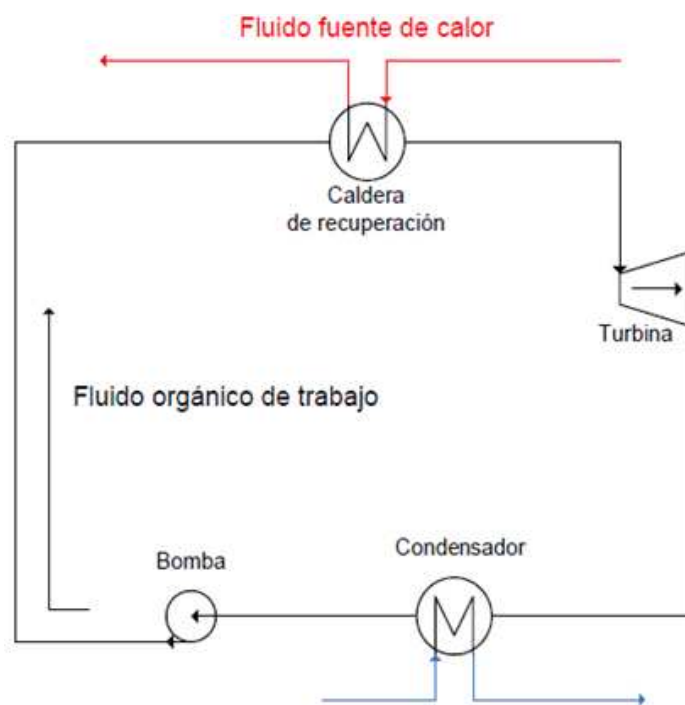


FIGURA 1. 11 Diagrama ciclo ORC simplificado.

**Fuente:** Propia

(4) SCHUSTER, A., KARELLAS, S., KAKARAS, E., SPLIETHOFF, H. Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. Applied Thermal Engineering,. 2009. Vol. 29.

Las características por las que el ORC es diferente al ciclo de Rankine tradicional son las siguientes:

- Pendiente de la línea de vapor saturado en el diagrama T-s positiva: asegura que no habrá nunca mezcla bifásica a la salida de la turbina sino que todo será vapor sobrecalentado. Esto permite iniciar la expansión en la turbina desde vapor saturado, evitando así la inclusión de un sobrecalentador en la caldera de recuperación.
- La entalpía de vaporización de este tipo de fluidos es muy pequeña, ocurriendo casi todo el proceso de aceptación de calor en la zona de estado líquido. Esto permite que en dicho proceso la temperatura del ciclo se aproxime de forma casi permanente a la de la corriente caliente, con el consiguiente aumento de rendimiento y la reducción de irreversibilidades.
- Entre los posibles fluidos orgánicos, existe una amplia gama cuya presión de condensación a temperatura ambiente es superior a la atmosférica. La elección del fluido de trabajo más adecuada para la instalación dependerá de varias variables, jugando con ellas para maximizar el rendimiento energético.

### **1.5.2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO**

El ORC es un ciclo de motor térmico. Se compone de cuatro procesos termodinámicos, observar la Figura 1.12:

- Adicción del calor (Punto a-c), presión constante.
- Expansión Isentropica (Punto c-ds; incluyendo la eficiencia de la turbina c-d)
- Rechazo de calor (Punto d-f), presión constante.
- Compresión Isentropica (Bomba, Punto f-a).



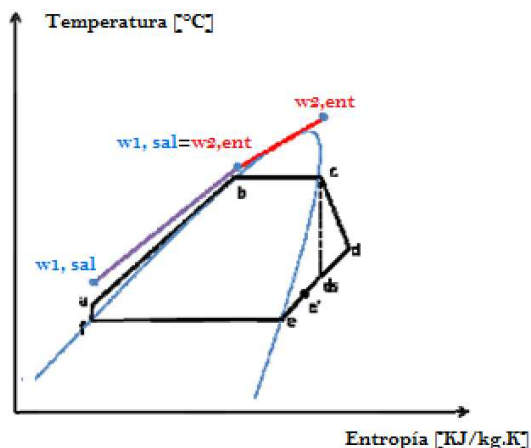


FIGURA 1. 12 Diagrama T vs S; del Ciclo Rankine Orgánico

**Fuente:** (5)

Las abreviaturas de los puntos del diagrama antes expuesto, se explica mediante la Tabla 1.3:

TABLA 1. 3 Puntos que intervienen en el ORC

Puntos	Descripción
a	Después de la bomba, antes del Pre-calentador
b	Después del Pre-calentador, antes del evaporador
c	Después del evaporador, antes de la turbina
d	Después de la Turbina REAL
ds	Después de la Turbina IDEAL
e`	Probable punto donde empieza a condensarse
e	Fluido Orgánico empieza a condensarse
f	Después del condensador, antes de la bomba

(5) **Pawel Grabínski**, Optimization of the Performance of an Organic Rankine Cycle used as Waste Heat Recovery System in a Bio-Liquid Diesel.

Para poder obtener una mejor eficiencia, a este ciclo se le divide en dos intercambiadores de calor. El primero será el pre-calentador (regenerador). En la Figura 1.12 se observa una línea entre los puntos "a" y "b".

Comienza justo después de la bomba (f-a) y termina en el punto de saturación del líquido en el punto "b". En dicho punto ingresa el fluido orgánico al evaporador donde la primera burbuja de vapor aparece, por lo que comienza la evaporación, llevándose a temperatura constante asociado a la presión de saturación. La evaporación se termina cuando todo el líquido se vaporiza y en esa etapa el vapor sale del evaporador y entra en la turbina.

La expansión dentro de la turbina se produce entre los puntos "c" y "d". La expansión es desde el punto "c" a "ds", pero generalmente la eficiencia de la turbina es siempre menor que el 100%; por lo que la expansión en la práctica es desde "c" a "d". Debido a la expansión del vapor en la turbina se produce trabajo útil que se transforma en electricidad mediante un generador el cual está conectado a través de un eje.

Todos los puntos "a-b-c" se encuentran en el mismo nivel de presión llamada presión de vaporización. Existe casi siempre una caída de presión de 0,5 bares en cada intercambiador de calor en el lado de la vaporización del ciclo.

Los puntos "d(ds)-e-e`-f" tienen la misma presión. Y se encuentran en el lado de baja presión del ciclo. Después de la turbina, en el punto "d", el vapor está todavía como vapor sobrecalentado.

En el estado " e' " el vapor de agua está llegando a la línea de saturación de vapor, por lo que en este punto se indica que la condensación se ha iniciado. Su presión de trabajo está relacionada con los parámetros del aire. La condensación termina en el punto "f", que es en la línea de saturación de líquido. De allí el fluido de trabajo es bombeado de nuevo hacia el pre-calentador, repitiéndose el ciclo.

Durante el bombeo (puntos de "f-a") la presión de condensación es mayor a la presión de vaporización. Cabe indicar también que por el lado de la condensación no hay pérdidas de presión incluido en el intercambiador.

Como se menciona en este capítulo el modelo matemático del ORC, consiste en ecuaciones de balance de energía en cada intercambiador de calor. Por ello en el siguiente punto se indica las ecuaciones que se maneja en el ciclo.

### 1.5.3 ECUACIONES DEL CICLO RANKINE ORGÁNICO

Las ecuaciones utilizadas para determinar la eficiencia del ORC se presentan en ésta sección, utilizando la primera y segunda ley de la Termodinámica. De igual manera es importante conocer que el rendimiento de trabajo del ciclo puede ser evaluado bajo diversas condiciones de trabajo, para diferentes fluidos orgánicos de trabajo.

En la Figura 1.13 indica la configuración sencilla del ORC para convertir el calor residual en energía eléctrica útil.

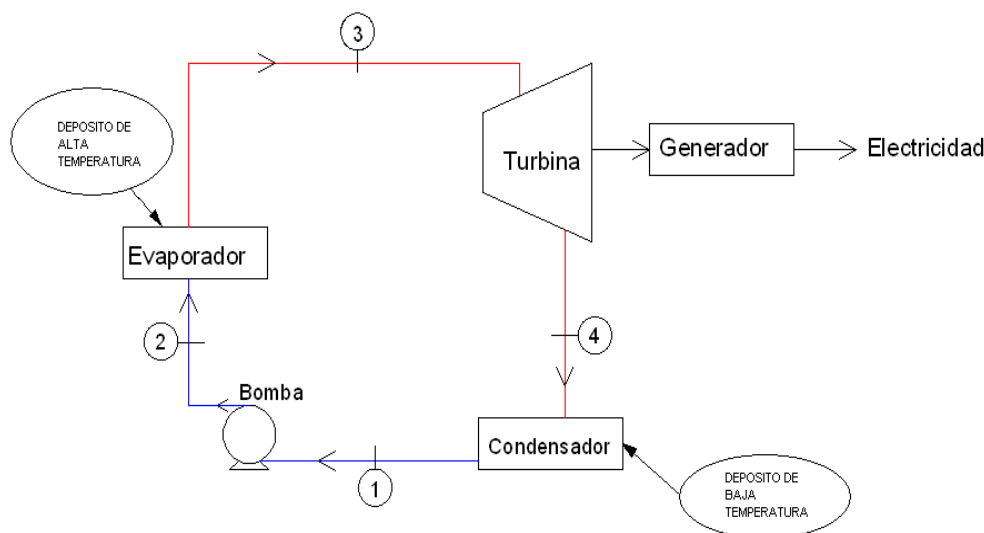


FIGURA 1. 13 Configuración simple del ORC

Fuente: (4)

#### 1.5.3.1 Proceso en la Bomba

Después del condensador, el fluido de trabajo sale como líquido saturado, y para ello se necesita encontrar la potencia de bomba para poder hacer recircular el fluido orgánico dentro del circuito

(4) SCHUSTER, A., KARELLAS, S., KAKARAS, E., SPLIETHOFF, H. Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. Applied Thermal Engineering,. 2009. Vol. 29.

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}_{wf} \cdot v_f \cdot (P_1 - P_2) \quad \text{Ec.1. 5}$$

Donde:

$\dot{W}_{bomba}$  : Potencia de la bomba [kw]

$\dot{m}_{wf}$  : Flujo másico del fluido orgánico del ORC [Kg/s]

$v_f$  : Volumen específico del fluido de trabajo antes de la bomba [m<sup>3</sup>/kg]

$P_1$  : Presión antes de la bomba [kPa]

$P_2$  : Presión después de la bomba [kPa]

### 1.5.3.2 Proceso en el Evaporador

En el evaporador se intercambia calor entre la fuente de calor y el fluido de trabajo, el cual es calentado hasta el punto de vapor sobrecalentado. La tasa de transferencia de calor del evaporador en el fluido de trabajo es:

$$\dot{Q}_{23} = \dot{m}_{fluido}(h_2 - h_3) \quad \text{Ec.1. 6}$$

Donde;

$h_2, h_3$  : Entalpías del fluido de trabajo, en la entrada y salida del evaporador, respectivamente.

$\dot{m}_{fluido}$  : Flujo másico del fluido que calienta el fluido orgánico

### 1.5.3.3 Proceso en la Turbina

El líquido orgánico de trabajo se encuentra sobrecalentado o vapor saturado, éste pasa a través de la turbina para generar energía mecánica, después el vapor se expande dentro de la turbina, existe una caída de presión (despresuriza) por los alabes de la turbina, la eficiencia de la turbina está dada por:

$$n_{turbina} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad \text{Ec.1.7}$$

Donde;

$n_{turbina}$  : Eficiencia Isentrópica de la turbina

$h_4$  : Entalpía del fluido de trabajo después de la turbina [KJ/kg]

$h_{4s}$ : Entalpía del fluido de trabajo después de la turbina, si la expansión de la turbina fuese Isentrópica [KJ/kg]

#### 1.5.3.4 Proceso en el Condensador

El fluido orgánico de trabajo sale de las turbinas y se dirige a presión constante hacia el condensador en estado de líquido saturado debido al rechazo de calor latente en el medio ambiente o simplemente por líquido refrigerante del condensador. La tasa de transferencia de calor del evaporador en el fluido de trabajo está expresada como:

$$\dot{Q}_{14} = \dot{m}_{liquido}(h_1 - h_4) \quad \text{Ec.1.8}$$

$\dot{Q}_{14}$  : Tasa de transferencia de calor del condensador [kw]

$\dot{m}_{liquido}$  : Flujo másico del líquido [kg/s]

#### 1.5.3.5 Eficiencia del ORC

La eficiencia térmica de este ciclo se define como el cociente entre la potencia neta del ciclo para la transferencia de calor del evaporador, y se expresa de la siguiente manera:

$$\eta_{ciclo} = \frac{\dot{W}_t + \dot{W}_p}{\dot{Q}_e} \quad \text{Ec.1.9}$$

## **1.5.4 FLUIDOS APTOS PARA EL ORC**

Los ciclos ORC emplean fluidos orgánicos, normalmente hidrocarburos naturales. La elección del fluido de trabajo concreto dependerá de las propiedades del mismo, analizables en su campana bifásica, en la cual nos indica la entropía, la entalpía a cierta temperatura y presión, además es importante su funcionamiento en las condiciones de la instalación.

Dado el amplio espectro de fluidos posibles, se sigue una serie de criterios según el tipo de ciclo que se espera obtener para dar con el más adecuado.

Un primer criterio, común para todos los casos, es un criterio medioambiental: hay que tener en cuenta la legislación vigente que prohíbe el empleo de ciertos refrigerantes debido a su capacidad de destrucción de la capa de ozono, en especial los derivados de hidrocarburo.

Además, se descartarán todos aquellos que condensen a presión inferior a la presión atmosférica, para así evitar requerir la incorporación al ciclo de un desgasificador, con la consiguiente simplificación y abaratamiento de la instalación.

### **1.5.4.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN FORMA DOMO DIAGRAMA T VS S**

La masa molecular, la temperatura de ebullición normal, la temperatura crítica, el calor latente de vaporización, el calor específico en fase líquida y el estado de vapor son propiedades termo físicas de los fluidos de trabajo que influyen en la forma de las curvas de saturación.

La curva de saturación es muy importante para el aprovechamiento del calor residual, porque influye en el proceso de intercambio de calor entre la fuente de calor y el fluido de trabajo, y después influye en la expansión en la turbina.

Con respecto a la forma de las curvas de vapor saturado en el diagrama T-s, los clasifica en tres grupos diferentes.

El primer grupo lo forman aquellos fluido cuya pendiente de vapor saturado es positiva ( $dT/dS > 0$ ). Esto significa que el proceso de expansión isoentrópica en la turbina termina en la región de vapor sobrecalentado, eliminando el riesgo

de formación de gotas en la turbina, sin embargo, el condensador debe eliminar proporcionalmente más energía.

Otra característica de estos fluidos es que su peso molecular es alto en comparación con respecto a los de otras familias.

Además, como se ha indicado, tienen bajo valor de entalpía de evaporización y baja carga entálpica, que les obliga a aumentar el flujo másico. Esto reduce el número de etapas que hay que instalar en la turbina. Algunos de estos fluidos son: n-pentano, el benceno y el tolueno.

El segundo grupo se caracteriza porque la curva de saturación de vapor de los fluidos es menor a cero, ( $dT/ds < 0$ ) y se llaman fluidos húmedos.

Los fluidos de ese grupo deben ser primero sobrecalentados antes de que entren en la turbina, para evitar que las gotas de líquido saturado dañen seriamente el equipo.

Estos poseen bajo peso molecular, que implica mayor entalpía de vaporización. Además, ésta característica es deseable para mejorar el rendimiento de las turbinas. El agua, el amoníaco etc. son ejemplos de este grupo. En estas máquinas el vapor expandido en la turbina suele acabar en la zona bifásica, y frecuentemente deben sobrecalentarse para evitar la corrosión en la turbina.

Se puede encontrar un tercer grupo en el cual la pendiente de saturación es infinita, y la curva de saturación coincide con la línea isoentrópica. En la práctica significa que el proceso de descompresión isoentrópica tiene lugar a lo largo de la curva de saturación o en la paralela.

Sin embargo solo hay un número limitado de fluidos que obedecen ésta condición, como por ejemplo el triclorofluorometano o el diclorofluorometano. Gráficamente se puede ver en la Figura 1.14.

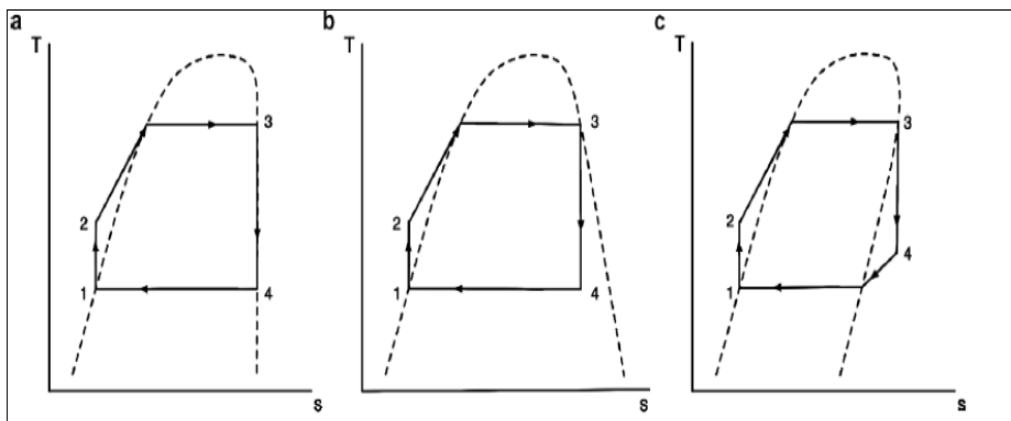


FIGURA 1. 14 Comparación de diagramas T-s para fluidos a: isentrópicos, b: húmedos, c: secos en un ciclo ideal con expansión isentrópica.

**Fuente:** (6)

## 1.6 CONDICIONES DEL LUGAR

Es una zona con clima húmedo tropical lluvioso, con altas precipitaciones, elevada humedad y temperaturas que no varían significativamente entre el invierno y el verano y rodeada de exótica vegetación y fauna típica de la selva.

La elevación promedio sobre el nivel del mar de las instalaciones es del orden de los 245 m.

Se dispone de dos rutas de acceso al Bloque 16, la primera es terrestre desde el puerto de Esmeraldas – Quito – Lago Agrio – Shushufindi – Limoncocha – Pompeya. La segunda por vía fluvial desde Manaos (Brasil), Río Amazonas (Perú) y por el Río Napo hasta Pompeya. En la carretera se han construido 33 puentes, tipos Bayley, Acrow y Mabey .

El tipo de terreno es ondulado, con áreas sujetas a inundación en los sitios cercanos a las cuencas hidrográficas, siendo las más importantes: río Napo, río Tiputini, río Yasuní, río Dicaro, río Nashiño.

Los siguientes datos climáticos serán considerados en el presente estudio de factibilidad, para ello se expresa en las Tablas 1.4 y 1.5, respectivamente:

(6) <http://ebookbrowse.com/taz-pfc-2010-022-pdf-d222171992>.



TABLA 1. 4 Temperatura Ambiente

	<b>Bulbo Seco (°F)</b>	<b>Bulbo Húmedo (°F)</b>
Máxima Diseño	102	97
Promedio Diseño (Verano / Invierno)	95 / 80	82 / 77,5
Mínima Diseño	59	57

TABLA 1. 5 Presión Barométrica

Máxima Diseño	14,32 PSIG
Mínima Diseño	14,02 PSIG

## 1.7 CONCEPTOS BÁSICOS DE INGENIERÍA ECONÓMICA

### 1.7.1 VALOR DE DINERO EN EL TIEMPO

Es la variación de la cantidad de dinero en un período de tiempo dado.

### 1.7.2 INTERÉS

Es la expresión del valor del dinero en el tiempo. El interés es la diferencia entre la cantidad final de dinero y la cantidad original.

$$\text{Interés} = \text{Cantidad que se debe hoy} - \text{Cantidad original} \quad \text{Ec.1. 10}$$

### 1.7.3 TASA DE INTERÉS

Es el resultado del interés pagado con respecto a una unidad de tiempo específica y expresada como porcentaje de la suma original.

$$\begin{aligned} \text{Tasa de interés } i(\%) & \quad \text{Ec.1.11} \\ & = \frac{\text{interés acumulado por unidad de tiempo}}{\text{suma original}} \times 100\% \end{aligned}$$

### 1.7.4 EQUIVALENCIA ECONÓMICA

Implica que dos sumas diferentes de dinero en distintos tiempos tienen el mismo valor económico.

### 1.7.5 INTERÉS SIMPLE

Se trata de los intereses que produce una inversión en el tiempo gracias al capital inicial. Se calcula utilizando exclusivamente el capital principal e ignorando cualquier interés generado en los periodos de interés procedentes. El interés simple total durante varios periodos se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Interés} = (\text{capital principal})(\# \text{periodos})(\text{tasa de interés}) \quad \text{Ec.1. 12}$$

### 1.7.6 INTERÉS COMPUESTO

El interés generado durante cada periodo de interés, se calcula sobre el capital principal más el monto total de interés acumulado en todos los periodos anteriores, se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Interés} = (c. \text{principal} + \text{todos los intereses acumulados})(\text{tasa de interés}) \quad \text{Ec.1. 13}$$

### 1.7.7 TASA DE RETORNO (TR)

Es la cantidad obtenida como ganancia dividida entre la cantidad original, ésta tasa orientada al futuro se basa en el supuesto de que se llevarán a cabo todos los pagos prometidos o proyectados, y que el valor inicial del papel es el precio más reciente del mercado.

Esta tasa de retorno se ve afectada por los cambios en las proyecciones tanto de los pagos como del precio de mercado.

### 1.7.8 TASA MÍNIMA ATRACTIVA DE RETORNO (TMAR)

Se debe establecer una tasa razonable para la fase de elección de criterios en un estudio de ingeniería económica. (7)

$$ke = Tasa Activa + Tasa Pasiva \quad \text{Ec.1. 14}$$

$$TMAR = inflacion + ke + (inflación \times ke) \quad \text{Ec.1. 15}$$

Donde;

$ke$  : Costo de oportunidad

### 1.7.9 VALOR ACTUAL NETO DE LA INVERSIÓN (VAN)

Es el exceso del valor actual de los ingresos generados por el proyecto menos la inversión.

Si el VAN es positivo se acepta el proyecto, caso contrario si es negativo se lo rechaza (7).

$$VAN = -I + \left( \frac{Q_1}{(1+i)^{n-1}} \right) + \left( \frac{Q_1}{(1+i)^{n-2}} \right) + \dots + \left( \frac{Q_1}{(1+i)^n} \right) \quad \text{Ec.1. 16}$$

Donde;

$I$  : Inversión

$Q_1$  : Valor neto de los distintos flujos de caja

$i$  : Tasa de Retorno del Período

$n$  : Número de Periodos.

### 1.7.10 TIR

Tasa interna de retorno, es la tasa de interés que iguala a la inversión con el valor actual de los ingresos futuros. Para calcular el TIR es necesario que el VAN sea igual a cero. (7)

---

(7) Blank L., Tarquin A., Ingeniería Económica; MacGraw-Hill, 2004

## CAPÍTULO 2

### DESCRIPCIÓN ACTUAL DEL CIRCUITO DE ACEITE TÉRMICO

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presenta la situación actual de sistema de recuperación de calor, de sus elementos y operaciones, los datos obtenidos que se mencionan a continuación, son datos tomados en campo, soportes de catálogos, y registro de operación que son tomados a diario por los operadores de la Estación de Deshidratación NPF.

En este sistema de recuperación se quiere implementar el nuevo sistema de captación de gases de escape para su aprovechamiento mediante el Ciclo Rankine Orgánico para la generación eléctrica

#### 2.2 ELEMENTOS DEL PROCESO

##### 2.2.1 TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ACEITE T-1075



FIGURA 2. 1 Tanque de almacenamiento de aceite térmico

La función principal de este tanque (T-1075), es la de almacenar el aceite térmico que circula dentro del circuito cerrado de recuperación de calor, por lo que el aceite ingresa de nuevo a este tanque desde los recuperadores de calor mediante un drenaje. Ver Figura 2.1.

La capacidad de almacenamiento del tanque es aproximadamente de 500 BBL, el material que se encuentra construido es de acero al carbono, y puede soportar una temperatura de 240°F.

### **2.2.2 BOMBA DE TRANSFERENCIA P-1076**



FIGURA 2. 2 Bomba de Transferencia P-1076

La función principal de la bomba de transferencia es la de ayudar a fluir el aceite térmico desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque de expansión, actualmente la bomba no está funcionando debido a que el sistema cerrado no lo necesita. Es decir, simplemente que ésta bomba es un respaldo para poder generar mayor presión cuando el sistema lo requiera. Trabaja a 1800 RPM, en un rango de temperatura de 80 a 165 °F, con una presión aproximada de 58.4 PSIG. Ver Figura 2.2.

### **2.2.3 TANQUE DE EXPANSIÓN V-1070**



FIGURA 2. 3 Tanque de Expansión V-1070

Es un recipiente utilizado en los sistemas de recuperación de calor para lograr absorber la presión del aceite térmico en exceso, que puede ser causada por la expansión térmica al calentarse. Ver Figura 2.3.

El aceite térmico llega proveniente desde el tanque de almacenamiento directamente o por la ayuda de una bomba de transferencia. En las instalaciones del Bloque 16, el tanque de expansión tiene una capacidad de 12.900 Galones, soporta una temperatura dentro de un rango de 50-550°F.

#### 2.2.4 BOMBAS DE CIRCULACIÓN P-1071 A/B/C



FIGURA 2. 4 Bombas de Circulación

Al ser un sistema de circuito cerrado, la bomba ayuda a superar la fuerza de fricción del sistema, haciendo que el aceite térmico se presurice a un nivel de 160 PSIG.

Dentro del sistema se tienen tres bombas; P-1071A/B/C las cuales recirculan el aceite térmico hacia el recuperador de calor H-1072A/B, el cual se explica en el siguiente punto. Ver Figura 2.4.

## 2.2.5 INTERCAMBIADORES/RECUPERADORES DE CALOR, H-1072 A/B

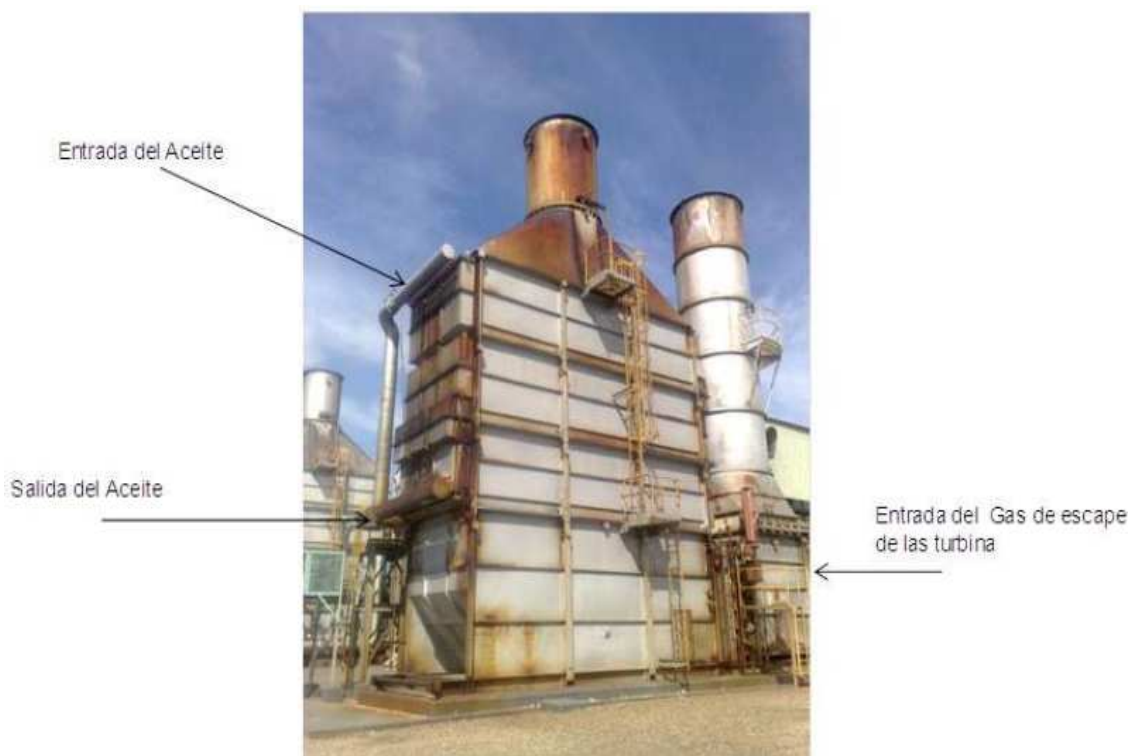


FIGURA 2. 5 Intercambiador/Recuperador de calor A v B en NPF

Es una cámara con un serpentín interno por donde circula el aceite térmico, a través del recuperador circulan los gases calientes de la combustión producida por las turbinas. Estos gases realizan un intercambio de calor para poder realizar una recuperación de calor residual. Ver Figura 2.5.

Existen unas compuertas denominadas dâmperes que permiten el paso de los gases emanados por las turbinas, la primera compuerta se abre un cierto porcentaje para que ingrese hacia la cámara donde se transferirá el calor de los gases hacia el aceite térmico, mientras que la otra compuerta se quedará semi-abierta permitiendo que se libere gases de escape hacia la atmósfera por medio de la chimenea.

Esto se realiza con la finalidad de no calentar mucho al aceite, depende mucho de las necesidades que tenga el proceso de separación del crudo. El valor pre-establecido del aceite térmico a la salida del recuperador de calor es de 500 °F.

Tabla 2. 1 Características del Recuperador de Calor

<b>Flujo a Manejar</b>	Aceite Térmico
<b>Rendimiento</b>	80 000 000 BTU/Hr
<b>Presión y temperatura de diseño de tubo</b>	150 psig/660°F
<b>Material de los tubos</b>	ASTM A106 grB
<b>Dimensión y espesor de los tubos</b>	3,5"/0,126" Av. Wall
<b>Prueba hidrostática</b>	225 PSIG

### 2.2.6 TURBINAS GE LM2500, G-1170



FIGURA 2. 6 TURBINAS GE LM2500

La turbina transforma la energía térmica y potencial del vapor en energía cinética, al expandirse el vapor en las toberas de la turbina. De aquí se dirige en flujo axial hacia las zonas de baja presión.

El combustible de trabajo de la turbina es el que se refina dentro de NPF, llamada la Planta Topping. En la actualidad la potencia máxima de trabajo de ambas turbinas es de 27 Mw.



## 2.2.7 INTERCAMBIADORES DE CALOR

### 2.2.7.1 Intercambiador de calor E-1160



FIGURA 2. 7 Intercambiador de Calor E-1160

Dentro del sistema de aceite térmico se hallan dos intercambiadores de características de tubos y carcasa, el crudo ingresa por los tubos, mientras que el aceite térmico fluye a través de la carcasa. Trasfiriendo calor desde el aceite hacia el crudo.

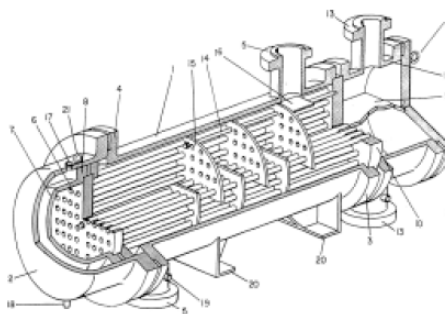


FIGURA 2. 8 Parte interna del intercambiador de calor

El crudo ingresa por una sección acanalada y circula hasta una tapa fija a la placa de tubos flotantes. Tanto el canal como la tapa del cabezal flotante tienen deflectores adecuados para que en el lado de los tubos haya el número de pasadas apropiado a las condiciones del proceso.

El aceite térmico del lado de la carcasa entra por un extremo, pasa guiado por deflectores adecuados sobre los haces y sale por el otro extremo. El crudo del lado de los tubos entra y sale por el distribuidor, haciendo dos pasadas por el haz.

### 2.2.7.2 Intercambiadores de Calor E-1104 Y E-1204

Estos intercambiadores se encuentran en los trenes A y B, los cuales realizan el proceso de separación del crudo como se había indicado anteriormente; pero este crudo es únicamente el extraído de los pozos de Tivacuno, Bogi y Capirón.

Al igual que el intercambiador de E-1160 se tratan de intercambiadores de tubos y carcasa. Por el lado de los tubos el crudo, y por el lado de la carcasa se tiene aceite de calentamiento. Los flujos de aceite de calentamiento y crudo están en contra flujo para una mayor transferencia térmica.



FIGURA 2. 9 Intercambiadores de calor E-1104 y E-1204

El propósito de este proceso es ganar en temperatura para poder disminuir la viscosidad del crudo y así posteriormente hacer más eficiente la separación de las fases en el proceso siguiente que se lo realizará en el separador de producción.

El aceite de calentamiento luego de pasar por el E-1104 y haber entregado su calor al crudo, retorna al sistema de aceite de calentamiento para nuevamente

ser calentado a la temperatura requerida en el proceso en el Intercambiador/Recuperador de calor H-1072A/B.

### **2.2.8 CARACTERÍSTICAS DEL ACEITE TÉRMICO**

Es un aceite mineral para sistemas de transferencia de calor no presurizados con fase líquida cerrada.

Poseen una baja presión de vapor y niveles elevados de estabilidad térmica, calor específico y conductividad térmica.

Recomendado para sistemas de calentamiento con temperaturas de fluido hasta 320 °C. Este producto tiene por naturaleza características de baja formación de carbonos y antioxidantes efectivos a altas temperaturas para lograr una vida prolongada al trabajar como transmisor de calor.

Para la información de las propiedades halladas en los ensayos se puede encontrar en el Anexo C

### **2.3 ESQUEMA DEL PROCESO ACTUAL DE RECUPERACIÓN DE CALOR**

Para tener mayor conocimiento se describe la conexión de cada uno de los elementos y como circula el aceite térmico, para ello se elaboró un esquema del proceso actual de recuperación de calor.

En dicha figura se resume la información que se encuentra en los P&IDS (Diagramas de Procesos de Instrumentación) basados en la base de datos de REPSOL.

El sistema es un circuito cerrado, donde se hace recircular al aceite térmico, de la manera en que la demanda de la producción lo necesite, éste circuito se encuentra controlado bajo un sistema de instrumentación electrónico, tanto para presión y temperatura de los fluidos que intervienen en el proceso. Ver la Figura 2.10.

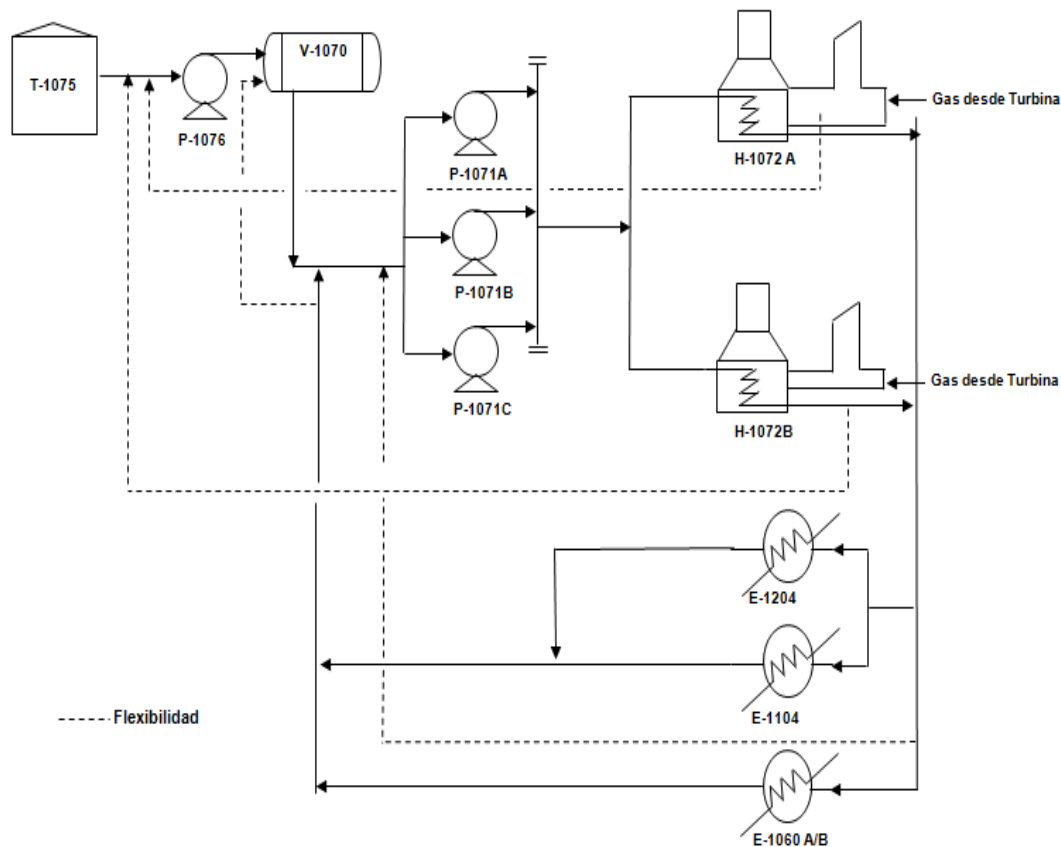


FIGURA 2. 10 Circuito de aceite térmico

**Fuente:** REPSOL

Cabe indicar que la flexibilidad indicada por la línea entrecortada en el proceso, es aquella que se utiliza según el requerimiento de producción.

## 2.4 DATOS DEL PROCESO ACTUAL DE RECUPERACIÓN DE CALOR

Los datos recogidos en el Bloque 16 en la estación de deshidratación NPF en cada uno de los elementos del proceso, ayudan de manera significativa para el respectivo estudio de factibilidad en la implementación del Ciclo Rankine Orgánico.

Con ello se logra obtener datos de temperaturas, presiones y caudales, en los intercambiadores de calor, mientras que los datos de las bombas se obtiene de las placas de fabricación.

Los datos registrados se indican en la Tabla 2.2 de la siguiente manera:

TABLA 2. 2 Temperatura, Presión y Caudal de los Intercambiadores de Calor del aceite térmico

Equipo	Temperatura (°F)		Presión (KPa)		Q (m <sup>3</sup> /h)
	Succión	Descarga	Succión	Descarga	
<b>E-1104 A/B</b>	146	88	512,27	344,64	50,58
<b>E-1204 A/B</b>	146	88	512,27	344,64	50,58
<b>E-1160 A/B</b>	146	85	512,27	344,64	50,58
<b>H-1072 A/B</b>	85	149	551,42	448,03	25,29
<b>T-1108 A/B</b>	146	91	512,27	448,03	25,29

Los datos que se indican en la Tabla 2.2, se reflejan dentro de un esquema resumido de procesos los cuales indican la interconexión del sistema cerrado, registrando sus temperaturas, presiones y caudales, fundamentales para el presente estudio.

Dichos valores son no variaron mediante se realizó las mediciones, y mientras se estuvo en campo recogiendo datos. Por lo tanto que se asume que son constantes.

De igual manera estos datos los reflejamos en un esquema para obtener una idea más clara. Ver la Figura 2.11.

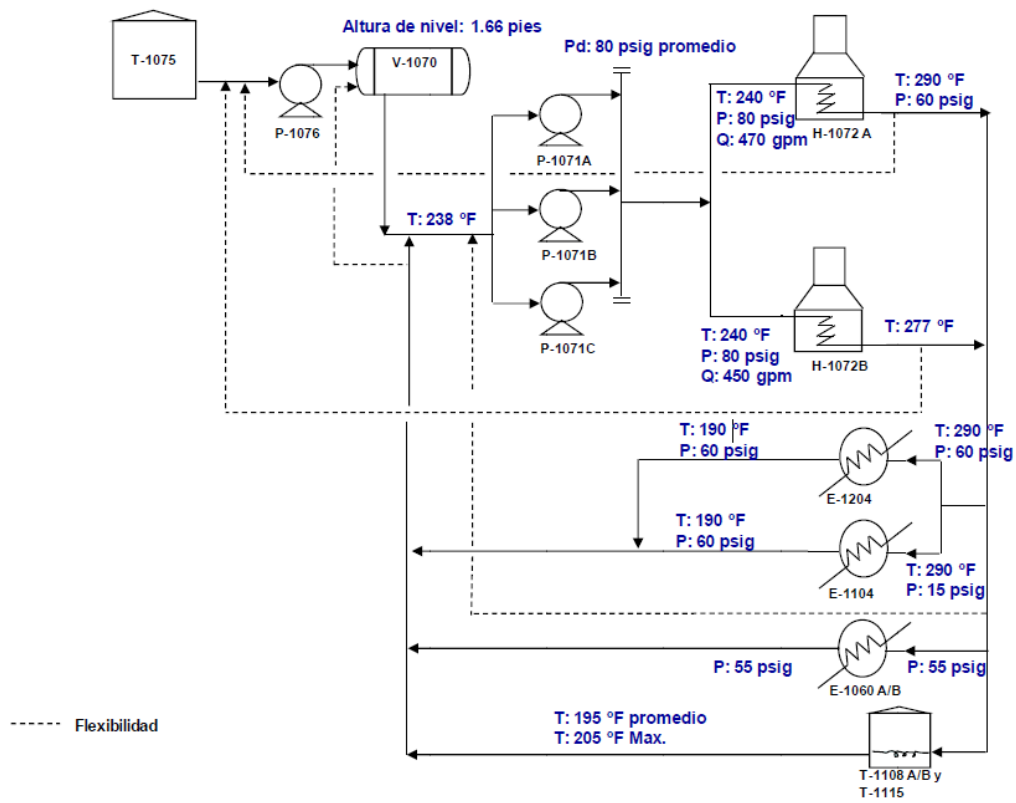


FIGURA 2. 11 Datos circuito de aceite térmico

Fuente: Propia

## **CAPÍTULO 3**

### **IMPLEMENTACIÓN DE CICLO RANKINE ORGÁNICO EN EL SISTEMA DE RECUPERACIÓN CALOR**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN**

En éste capítulo se estudia el fluido de trabajo escogido, como también la configuración seleccionada para implementar el Ciclo Rankine Orgánico en el circuito de aceite térmico.

Además de ello con la ayuda de la simulación en HYSYS 7.2 se introducen valores tomados en NPF sobre el circuito de aceite térmico, para proceder mediante la teoría construir un diagrama T vs S, y proceder a resolver los cálculos con las ecuaciones de este ciclo.

Por último se calcula las reducciones de consumo de combustible con su respectiva reducción de emisiones de gases de escape que se pueden reducir, con la implementación del Ciclo Rankine Orgánico, estos son los beneficios que presenta su implementación.

#### **3.2 BALANCE DE PLANTA**

Dentro de NPF existe un elevado potencial para la generación eléctrica a partir de los calores residuales del proceso.

En las Turbinas LM 2500, existe una oferta de calor residual procedente de los humos que se expulsan a la atmósfera.

Con ello se puede recuperar para convertir en energía eléctrica que cubra parcialmente la demanda eléctrica de la planta a través de un ciclo de Rankine orgánico (ORC).

En este apartado se analiza la viabilidad técnica de un ORC en la generación eléctrica en REPSOL. Para ello se estudia tanto el fluido más adecuado como la configuración de ciclo que maximiza la energía eléctrica producida con empleo de regeneración.

### 3.3 FOCO DE CALOR

La fuente de calor para el Ciclo Orgánico Rankine va a ser el aceite térmico que es calentado por los gases de escape. Para calentarlo a éste lo necesario los humos de escape ascienden a 77,5 kg/s.

Otro dato necesario para el modelado, es la temperatura de la salida del aceite térmico, siendo de 290°F, como se puede observar en la Figura 2.11.

Dentro del sistema de recuperación actual existen dos cámaras en H-1072 A, y H-1072 B, respectivamente, éstas tienen unos dámperes (compuertas) que se abren para permitir el flujo de gas de escape para calentar el aceite térmico, pero no se abren en su totalidad.

En la Tabla 3.1 se explica el porcentaje de apertura en las cámaras.

TABLA 3. 1 Porcentaje de gases de escape que calientan al aceite térmico.

<b>Cámara</b>	<b>Apertura, gases de escape (%)</b>	<b>Utilización para el OCR (%)</b>
H-1072 A	30%	70%
H-1072 B	10%	90%

Como se observa se puede aprovechar mayor calor si se abre más las compuertas los H-1072A/B, con esta apertura, es lógico que se debe incrementar el flujo másico del aceite térmico, para aprovechar sobre otro circuito (Ciclo Rankine Orgánico), y a su vez, para no alterar la función que actualmente realiza, que es la de mantener caliente al crudo.

### 3.4 ELECCIÓN DEL FLUIDO DE TRABAJO

Dentro del estudio es indispensable conocer cuán importante y factible son los fluidos de trabajo, puesto que gracias a ello se podrá obtener la mejor eficiencia, para ello en la siguiente tabla se tiene una lista de fluidos orgánicos:



TABLA 3. 2 Propiedades del Fluido Orgánico a utilizarse en el Ciclo

<b>Nombre del Fluido</b>	<b>Tc (°C)</b>	<b>Pc (Mpa)</b>	<b>T auto ignición (°C)</b>
Isopentano	187,2	3,4	420
n-Butano	152	3,8	405
n-Octano	296,2	2,5	220
Isobutano	134,7	3,6	460

Para la elección del fluido de trabajo que puede ser factible utilizar es necesario conocer la temperatura crítica del mismo puesto que no puede ser superior a la dada por el aceite térmico al ser abierta al 100% las compuertas (200°C).

Esto hace desechar el ciclo de Rankine clásico operado con agua, cuya temperatura crítica es 374°C. La elección del fluido idóneo se hará en base a las siguientes condiciones de contorno:

- Tcrítica < 200°C
- 0,1 Mpa < Psat (Tamb), para evitar tener que trabajar con presiones de vacío.
- Pmax < 6 Mpa, para no elevar el coste de los componentes.
- No ser perjudicial para la capa de ozono, es decir, que no contenga Cloro (no podrá pertenecer al grupo de los CFC ni al de los HCFC)

Estas restricciones reducen la lista de fluidos orgánicos a uno solo el cual es el isopentano.

El isopentano, es un alcano formado por cinco átomos de carbono mediante una estructura ramificada, cuya fórmula molecular es C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>. Su fórmula desarrollada viene dada en la Figura 3.1.

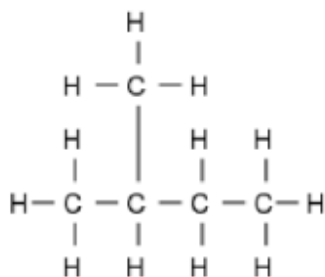


FIGURA 3. 1 Fórmula desarrollada del Isopentano

**Fuente:** (8)

En condiciones ambiente se presenta como un líquido incoloro con un olor característico. Es un compuesto muy volátil e inflamable, por lo que hay que tener cuidado a la hora de manipularlo a temperatura ambiente.

Es muy utilizado en la industria petroquímica como compuesto de síntesis entre otros compuestos para fabricar disolventes y productos farmacéuticos.  
(8)

### 3.5 CONFIGURACIÓN SELECCIONADA

La mayor desventaja del ORC es la baja eficiencia del ciclo (debido a las limitaciones termodinámicas que provoca la baja temperatura del foco caliente) y la dimensión de los intercambiadores de calor. Por tanto, es importante usar métodos para incrementar la eficiencia. Uno de estos es el uso del regenerador.

Se debe realizar un estudio de corrosión en tuberías por efecto de los gases de escape, pero para el caso actual no es indispensable debido a que el circuito del aceite térmico ya está instalado y este es quien tiene contacto directo con los gases de escape, además no existirá contacto directo entre los gases de escape con el ORC.

En resumen, la configuración final con la que se trabajará será un ciclo de Rankine orgánico regenerado, para aumentar la eficiencia y por el cual circulará isopentano, calentado por un aceite térmico.

---

(8) **Eneko Echeverría M.**, Economía de la utilización de Ciclos Binarios para recuperación de Calor de baja Temperatura.

### 3.6 ESQUEMA DEL CICLO

#### 3.6.1 ESQUEMA PROPUESTO POR REPSOL

Dentro de NPF, se dispone ya instalado un circuito de aceite térmico, con ello REPSOL, realizó un estudio en el cual se determinó una posible implementación de recuperación de calor mediante un Ciclo Rankine Orgánico.

Como se puede observar en la Figura 3.2; se divide en dos circuitos:

- Circuito del Aceite Térmico, explicado en el Capítulo 2 (existente).
- Circuito del Ciclo Rankine Orgánico, futura implementación de acuerdo al estudio, sobre el circuito del aceite térmico.

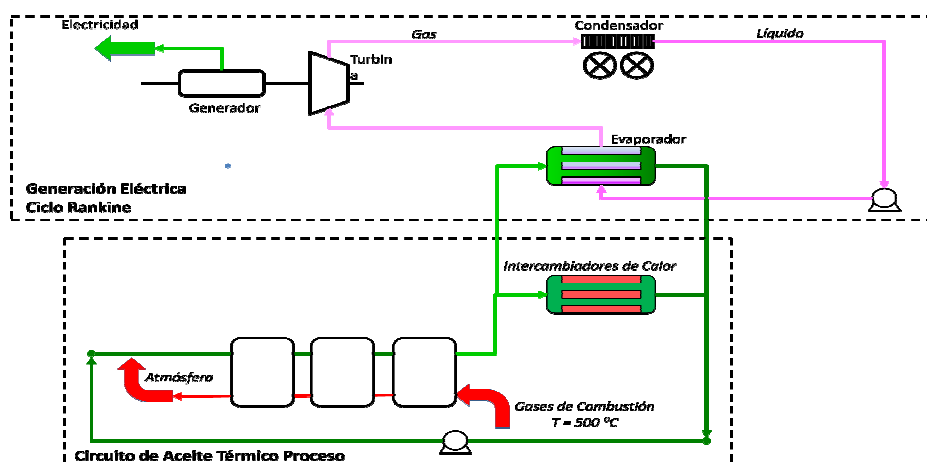


FIGURA 3. 2 Esquema sugerido por REPSOL

**Fuente:** REPSOL

En el primer circuito, los gases de escape salen a una temperatura de 500 °C por la turbina GE LM2500, G-1170, calientan al aceite térmico, en el intercambiador de calor, una vez aprovechado el poder calorífico de los gases de escape el aceite térmico calienta un fluido orgánico que circulará a través del evaporador.

Dentro del segundo circuito, donde intervendrá el ORC; en el evaporador, mediante la transferencia de calor, ingresa el aceite térmico (200°C) y permite que el fluido orgánico (isopentano) se evapore, para poder generar

movimiento a través de los alabes de la turbina, y con ello poder generar energía eléctrica.

A continuación se ilustra en la gráfica, el futuro acoplamiento al sistema de aceite térmico del ORC, en la planta NPF como se esquematizó en el apartado 2 en la Figura 2.10, además un circuito de condensación que permita condensar al isopentano.

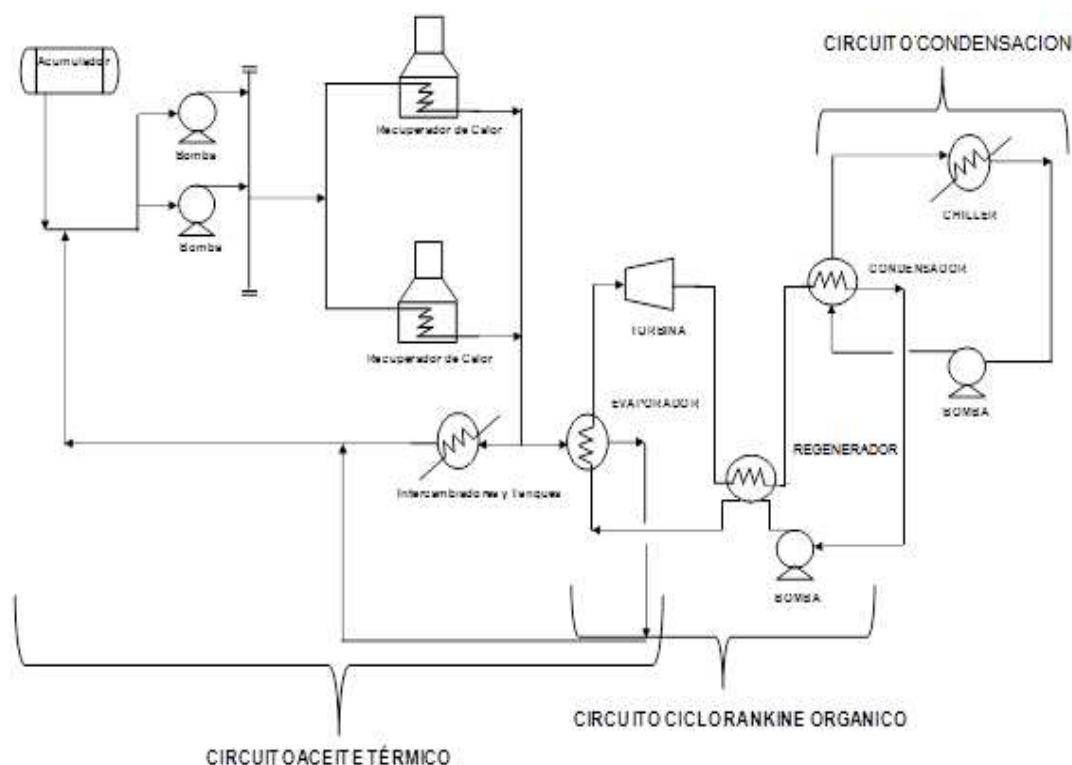


FIGURA 3. 3 Esquema del Proceso propuesto en NPF

**Fuente:** Propia

### 3.6.2 CONFIGURACIÓN DEL CICLO RANKINE ORGÁNICO

Una vez visto la configuración en la planta en general, y además de ello observar la propuesta recomendada por REPSOL se explica el funcionamiento del Ciclo Rankine Orgánico. El esquema del ORC de la planta se da en la Figura 3.4:

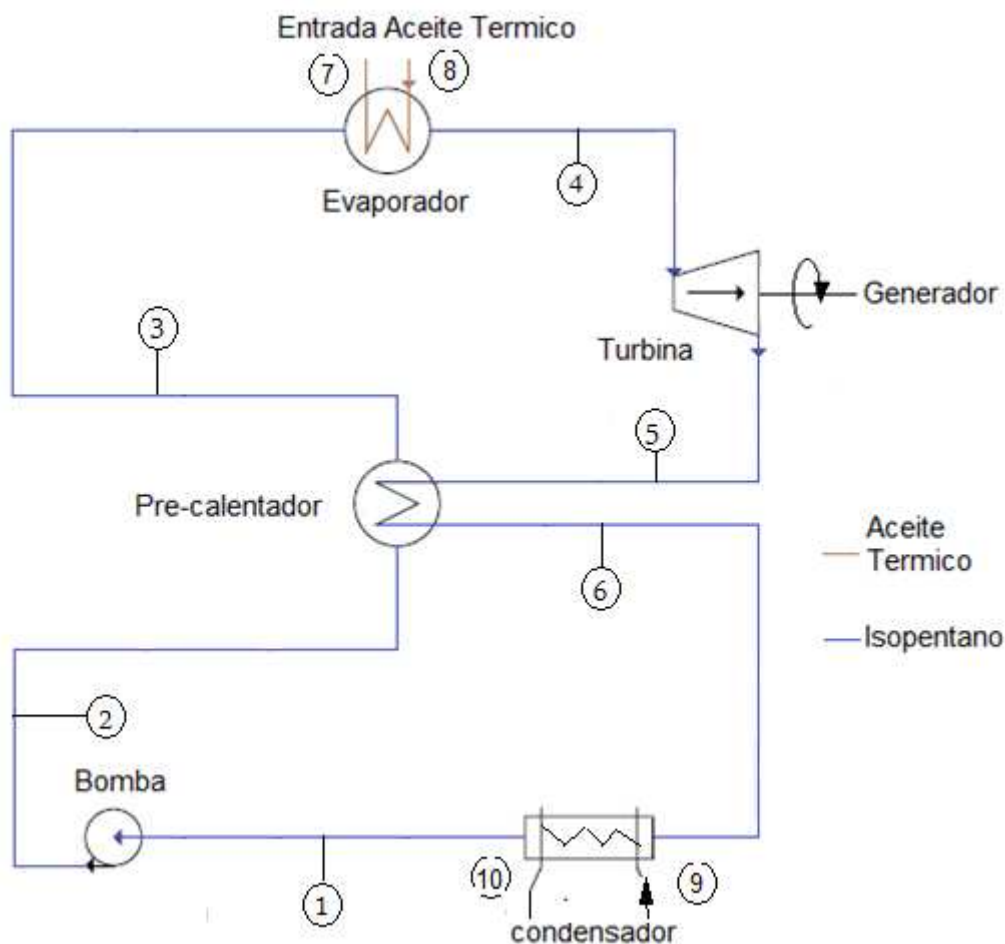


FIGURA 3. 4 Configuración del ORC

**Fuente:** Propia

Con la respectiva numeración presentada en la Figura 3.4, el ciclo comienza en la salida de la bomba (punto 1) dónde este recoge el fluido en condiciones de líquido subenfriado, presentando una temperatura baja y presión alta.

La bomba comprime el fluido hasta una presión a una presión de 1,14 veces el valor de la presión crítica del isopentano enviándolo directamente al pre-calentador (punto 2).

En el pre-calentador se establece el primer intercambio de calores. Dado por el mismo líquido orgánico, por el punto 2, ingresa en estado líquido, mientras que por el punto 5 ingresa en estado gaseoso, que sale de la turbina.

Después, en el evaporador (punto 7 y 8) tiene lugar la segunda transferencia de calor. Esta vez entre el aceite térmico (calentado por los gases de escape de la turbina), evaporando más al fluido de trabajo.

El elemento consecutivo es la turbina (punto 4), donde el fluido se expande generando un trabajo que dará lugar a la energía eléctrica por el generador.

Ahora el fluido orgánico ingresa en el pre-calentador por el lado de baja presión (punto 5). Éste aún se encuentra con un potencial térmico que se aprovecha en este intercambiador, como se mencionó anteriormente, para incrementar la temperatura se realiza antes de la entrada en el evaporador. De ésta manera se aumenta la eficiencia del ciclo.

Por último equipo está el equipo encargado de condensar el fluido orgánico (punto 10 y 9). Básicamente emplea agua como medio refrigerante. Una vez condensado será recogido por la bomba y enviado al regenerador, cerrándose así el ciclo.

### **3.7 MODELO MATEMÁTICO**

#### **3.7.1 ECUACIONES DEL MODELO**

A continuación se presentan las ecuaciones para la resolución del ciclo a partir de una serie de datos de partida y ecuaciones resultantes de la configuración del ciclo. Este apartado consta de dos partes diferenciadas.

La primera, denominada PUNTO DE DISEÑO, expone el modelo establecido para evaluar el funcionamiento del ciclo en su punto nominal, y poder así dimensionar los equipos.

El segundo apartado se trata el modelo de OPERACIÓN, que simula el funcionamiento del ciclo para operación fuera del punto nominal.

Finalmente, el modelo PÉRDIDAS DE CARGA explica los pasos seguidos para calcular las pérdidas de carga entre elementos.

Para poder desarrollar de mejor manera los cálculos, se debe tomar en cuenta las siguientes premisas:

- Fluido a utilizar en el Ciclo Rankine Orgánico: Isopentano
- La caída de presión en un enfriador y evaporador será de 5 psi (0.034MPa).

- Los valores de caudal, presión, temperatura, propiedades termo físicas, etc., del circuito del aceite térmico se encuentran en el apartado 2.
- Fluido a utilizar en el Circuito para el condensador del ciclo Rankine Orgánico: Agua
- El total de gases de combustión es de 2´795.190 GJ/año

### **3.7.2 PUNTO DE DISEÑO**

La evaluación se realizó con el simulador Hysys 7.2, se estableció ó fijó la composición del aceite térmico, la presión a la descarga de las bombas, la temperatura a la salida de los intercambiadores, de tal manera para que en cada punto del Circuito Rankine Orgánico, puedan ser conocidos los valores de temperatura, presión, flujo másico, etc.

Estos datos se los puede observar de mejor manera en el Anexo D. Con esta simulación se facilita de mejor manera los cálculos y puede llegar a ser más fiable, en la Figura 3.5, se observa el circuito simulado.

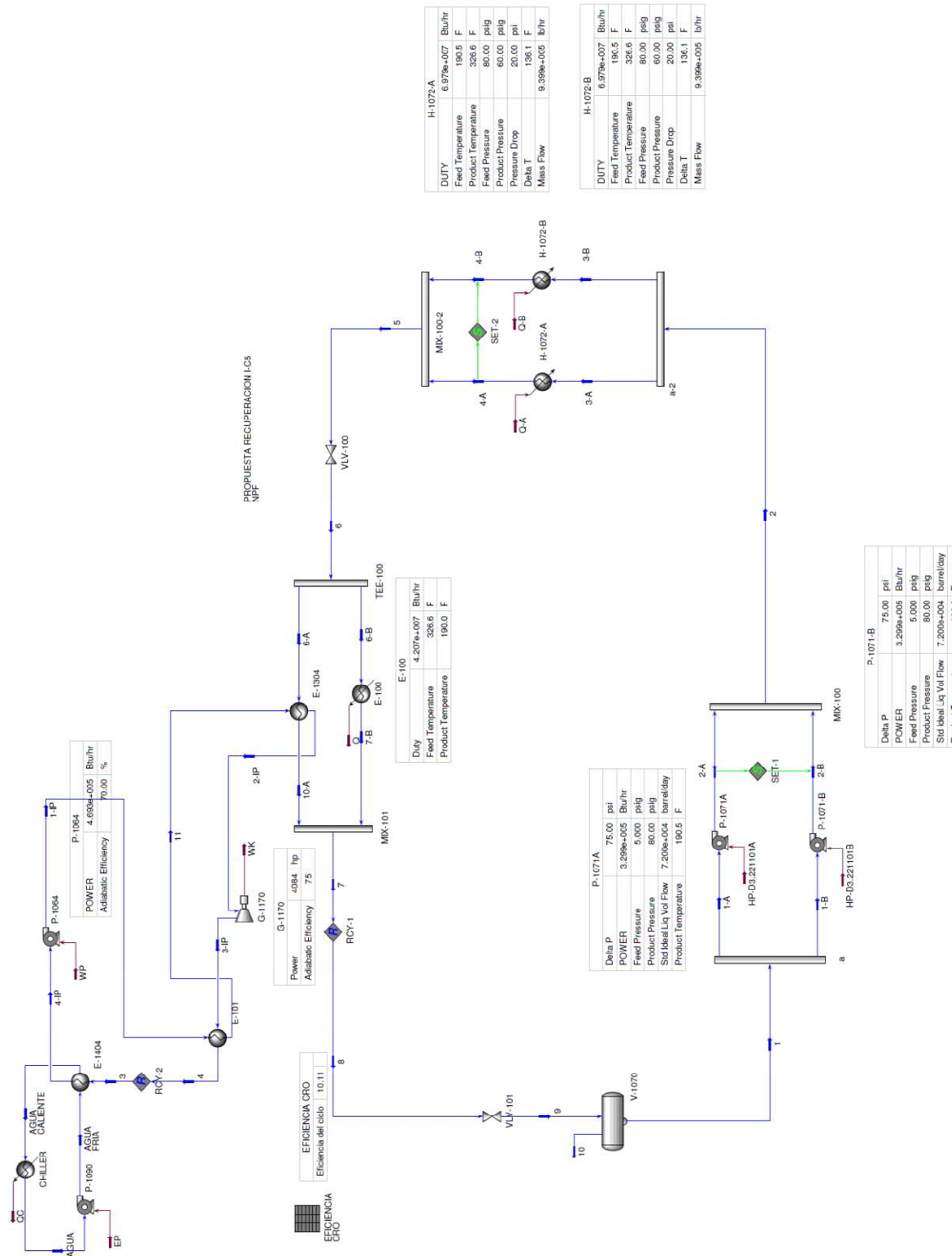


FIGURA 3. 5 Circuito de Aceite Térmico, Ciclo Rankine Orgánico y Circuito de Condensación, Simulado en HYSYS 7.2

Fuente: Propia



## DATOS

Una vez simulado con los datos dados se pudo determinar las temperaturas y presiones en los puntos de interés que se observa en la Figura 3.4, obteniendo los siguientes datos:

TABLA 3. 3 Datos tomados dentro del Ciclo Rankine Orgánico (simulación Hysys)

Punto	Presión Medida(psig)	Temperatura Medida (°F)
1	6	100,82
2	140	102,05
3	139	104,95
4	134	247
5	12	181,876
6	11	178,27

Para los cálculos necesariamente se debe realizar una conversión de unidades tanto en las temperaturas y en presiones demostrándose a continuación en la Tabla 3.4,

TABLA 3. 4 Conversión de unidades

Punto	P. medida(psig)	T. medid (°F)	Pabs (Psia)	Pabs (kPa)	Pabs (Mpa)	Temp. medida(K)
1	6	100,82	20,32	140,063	0,140	311,383
2	140	102,05	154,32	1063,706	1,064	312,067
3	139	104,95	153,32	1056,813	1,057	313,678
4	134	247	148,32	1022,349	1,022	392,594
5	12	181,876	26,32	181,420	0,181	356,414
6	11	178,27	25,32	174,527	0,175	354,411

Como modo de comprobación es recomendable realizar los cálculos de flujo másico, es muy importante debido a que influye directamente sobre las temperaturas actuales sobre el circuito de aceite térmico, y dichas temperaturas se basarán acorde a la producción o cantidad de crudo.

Estas fórmulas se encuentran plasmadas en el Anexo A.

Para la incorporación de Ciclo Rankine Orgánico sin que afecte en nada a las temperaturas actuales del Circuito de Aceite Térmico se manejarán los siguientes flujos másicos, siendo rangos máximos de operación:

- Flujo másico del aceite térmico:  $\dot{m}_{oil} = 166,15 \text{ kg/s}$
- Flujo másico del isopentano:  $\dot{m}_{iso} = 62,74 \text{ kg/s}$
- Flujo másico del agua:  $\dot{m}_{agua} = 176,9 \text{ kg/s}$

Otro dato importante es determinar la Temperatura de saturación que tiene el isopentano en las presiones encontradas, para ello mediante la utilización de la tabla de propiedades termo físicas del isopentano, se realiza el método iterativo y se halla la temperatura de saturación, correspondiente a la presión medida.

TABLA 3. 5 Temperatura de saturación del isopentano en las presiones medidas

Punto	Pabs (Mpa)	Tsat (K)
1	0,140	310,68
2	1,064	391,98
3	1,057	391,66
4	1,022	390,05
5	0,181	318,88
6	0,175	317,68

Con la ayuda de las tablas anteriores se puede realizar un diagrama T vs S, para poder identificar cada punto del ORC, y determinar sus respectivas entalpías. Reflejándose en la Figura 3.6

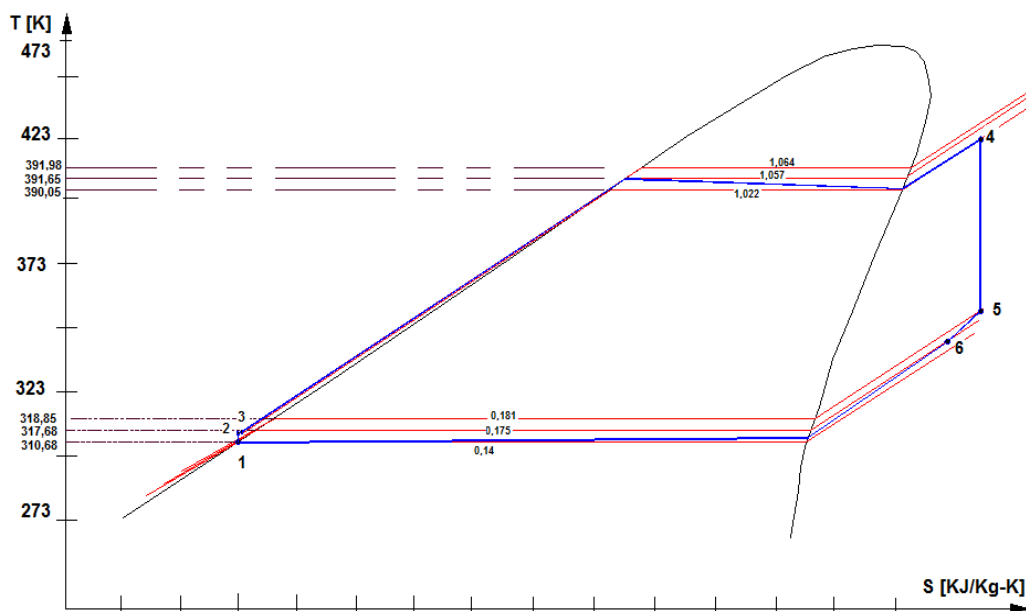


FIGURA 3. 6 Diagrama T vs S del Isopentano, ORC

**Fuente:** Propia

Para poder encontrar los valores de las entalpías en cada punto; es indispensable reconocer el lugar del punto (1,2,3,4,5,6) que se encuentra ubicado dentro del ORC, por ello en la Tabla 3.6 se especifica para cada uno, su fase, su temperatura y su presión, de la Figura 3. 6, y con ello poder orientarse en las tablas de propiedades del líquido isopentano, Anexo B (9) :

TABLA 3. 6 Fases y valores de Temperaturas y Presiones en cada punto

Punto	Fases	Valores
1	Líquido Comprimido	Tsat = 310,68 K
		P = 0,14 Mpa
2	Líquido Comprimido	Tsat = 312,82 K
		P = 1,064 Mpa
3	Líquido Comprimido	Tsat = 313,67 K
		P = 1,057 Mpa
4	Vapor Sobrecalentado	Tsat = 392,59 K
		P = 1,022 Mpa
5	Vapor Sobrecalentado	Tsat = 356,41 K
		P = 0,182 Mpa
6	Vapor Sobrecalentado	Tsat = 354,54 K
		P = 0,17 Mpa

(9) **Reynolds William C.**, Thermodynamic Properties In SI, Tables and Computational Equations for forty substances, Stanford University

Para el Punto 1:

$$h_1 = h_{f@0,14MPa} = 227,365 \text{ KJ/Kg}$$

Para el Punto 2:

$$h_2 = h_{f@312,06K} = 230,647 \text{ KJ/Kg}$$

Para el Punto 3:

$$h_3 = h_{f@313K} = 234,47 \text{ KJ/Kg}$$

Para el Punto 4:

$$\left. \begin{array}{l} P_4 = 1,022 \text{ Mpa} \\ T_4 = 392,59 \text{ K} \end{array} \right\} h_4 = 698,36 \text{ KJ/Kg}$$

Para el Punto 5:

$$\left. \begin{array}{l} P_5 = 0,181 \text{ Mpa} \\ T_5 = 356,41 \text{ K} \end{array} \right\} h_5 = 648,13 \text{ KJ/Kg}$$

Para el Punto 6:

$$\left. \begin{array}{l} P_6 = 0,17 \text{ Mpa} \\ T_6 = 354,42 \text{ K} \end{array} \right\} h_6 = 643,60 \text{ KJ/Kg}$$

### 3.8 CÁLCULOS EN EL CICLO RANKINE ORGÁNICO

#### 3.8.1 RECUPERADOR (EVAPORADOR)

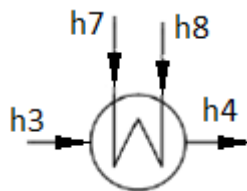


FIGURA 3. 7 Recuperador

**Fuente:** Propia

En el recuperador, el aceite térmico cede su calor al isopentano. Se ha optado por un intercambiador de coraza y tubos, por cálculos de flujo másico. Por los tubos circulará el aceite térmico y por consiguiente por la coraza el isopentano.

La potencia térmica intercambiada en el recuperador cumple las siguientes relaciones, dado que se puede calcular para los dos fluidos entre los cuales tiene lugar el proceso:

$$\dot{Q}_{rec} = \dot{m}_{aceite\ t} \times C_{p,aceite\ t} \times (T_8 - T_7) \quad \text{Ec. 3. 1}$$

Donde:

$\dot{Q}_{rec}$  : Tasa de Transferencia de calor en el recuperador (evaporador).

$\dot{m}_{aceite\ t}$  : Flujo másico del aceite térmico.

$C_{p,aceite\ t}$  : Calor específico del Aceite Térmico

$T_8$  y  $T_7$  : Temperatura entrada y salida del aceite al recuperador (evaporador).

$$\dot{Q}_{rec} = 166,15 \frac{kg}{s} \times 1,02 \frac{KJ}{Kg.K} (436,65 - 360)K$$

$$\dot{Q}_{rec} = 12.990Kw = 13Mw$$

La efectividad del recuperador, como la de cualquier intercambiador, es la razón entre la transferencia real de calor y la transferencia de calor máxima posible:

$$\varepsilon_{rec} = \frac{(T_8 - T_7)}{(T_8 - T_{in,iso,rec})} \quad \text{Ec. 3. 2}$$

Donde:

$\varepsilon_{rec}$  : Eficiencia del Recuperador (evaporador)

$T_{in,iso,rec}$  : Temperatura del Isopentano a la entrada del recuperador

$$\varepsilon_{rec} = \frac{(436,6 - 396,33)K}{(436,6 - 349,08)K}$$

$$\varepsilon_{rec} = 0,46 = 46\%$$

La relación de eficiencia con el  $NUT_{rec}$  y  $C_{r,rec}$ ; para el cálculo del NUT (2)<sup>16</sup>

$$\varepsilon_{rec} = 2 \times \left\{ 1 + C_{r,rec} + (1 + C_{r,rec}^2)^{1/2} \right. \\ \left. \times \frac{1 + \exp[-NUT(1 + C_{r,rec}^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NUT(1 + C_{r,rec}^2)^{1/2}]} \right\}^{-1} \quad \text{Ec. 3. 3}$$

Al ingresar esta ecuación se introducen nuevas incógnitas, que se revelan a continuación:

$$\Delta T_{rec;aceite t} = T_4 - T_3 \quad \text{Ec. 3. 4}$$

$$\Delta T_{rec;g} = T_8 - T_7 \quad \text{Ec. 3. 5}$$

$$C_{rec;aceite t} = \frac{\dot{Q}_{rec}}{\Delta T_{rec;aceite t}} \quad \text{Ec. 3. 6}$$

$$C_{rec;aceite t} = \frac{\dot{Q}_{rec}}{\Delta T_{rec;g}} \quad \text{Ec. 3. 7}$$

$$C_{r,rec} = \frac{\min(C_{rec;aceite t}; C_{rec;g})}{\max(C_{rec;aceite t}; C_{rec;g})} \quad \text{Ec. 3. 8}$$

Una vez obtenido el  $NUT_{rec}$  se calcula el  $UA_{rec}$ ;

$$NUT_{rec} = \frac{UA_{rec}}{\min(C_{rec;aceite t}; C_{rec;g})} \quad \text{Ec. 3. 9}$$

---

(2) F. Incropera, D. DeWitt, Principios de Transferencia de Calor

Donde;

$C_{rec;iso}$  : Capacitancia térmica del isopentano

$C_{rec;aceite t}$  : Capacitancia térmica del aceite térmico

$C_{r;rec}$  : Relación de capacidad de calor del recuperador

$NUT_{rec}$  : Número de unidades de transferencia del recuperador

$UA_{rec}$  : Coeficiente global de transferencia de calor del recuperador

$$\Delta T_{rec;iso} = 35,18K$$

$$\Delta T_{rec;g} = 136,58K$$

$$C_{rec;iso} = \frac{29.104,5Kw}{35,18 K} = 827,3 \frac{Kw}{K} = 827.302 \frac{W}{K}$$

$$C_{rec;g} = \frac{29.104,5Kw}{136,58 K} = 213,1 \frac{Kw}{K} = 213.095 \frac{W}{K}$$

$$C_{r;rec} = \frac{\min(C_{rec;iso}; C_{rec;g})}{\max(C_{rec;iso}; C_{rec;g})} = \frac{213,1 Kw/K}{827,3 Kw/K} = 0,258$$

$$\therefore NUT_{rec} = 0,673$$

$$UA_{rec} = NUT_{rec} \times \min(C_{rec;o}; C_{rec;g})$$

$$UA_{rec} = 143413$$

### 3.8.2 TURBINA

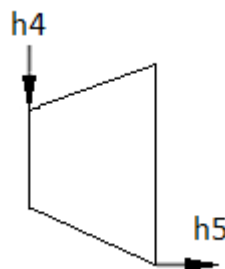


FIGURA 3. 8 Turbina

Fuente: Propia

La turbina es el elemento del ciclo que impulsa al generador eléctrico. A medida que el fluido orgánico pasa por ella cede energía a los álabes. Estos están unidos al eje que mueve el generador produciendo energía eléctrica.

Las ecuaciones de los estados termodinámicos a la entrada y a la salida de la turbina son las siguientes, conociendo un rendimiento isentrópico del 75%:

$$\dot{W}_{Turbina} = \dot{m}_{iso} \times (h_4 - h_5) \quad \text{Ec. 3. 10}$$

Donde;

$\dot{W}_{turbina}$  : Potencia de la turbina

$\dot{m}_{iso}$  : Flujo másico de isopentano.

$h_4$  y  $h_5$  : Entalpía de entrada y salida de la turbina.

$$\dot{W}_{turb} = (62,74 \text{ Kg/s}) \times (698,52 - 648,13) \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{W}_{turb} = 3161,47 \text{ Kw} = 3,1 \text{ Mw}$$

$$n_{turb} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}} \quad \text{Ec. 3. 11}$$

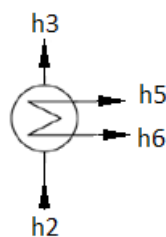
Donde;

$h_{5s}$  : Entalpía cuando es un rendimiento isentrópico

$$n_t = \frac{698,36 - 648,13}{698,36 - 628,5}$$

$$n_t = 0,701 = 70\%$$

### 3.8.3 PRE- CALENTADOR (REGENERADOR)





## FIGURA 3. 9 Regenerador

**Fuente:** Propia

El regenerador es un intercambiador de calor que aprovecha el calor del isopentano a la salida de la turbina para precalentarlo antes de que entre en el recuperador de calor. Este elemento aumenta el rendimiento del ciclo.

Las ecuaciones que derivan del uso del regenerador son las siguientes:

$$h_2 + h_5 = h_3 + h_6 \quad \text{Ec. 3. 12}$$

$$\varepsilon_{reg} = \frac{(h_6 - h_5)}{C_{65} \cdot (T_5 - T_2)} \quad \text{Ec. 3. 13}$$

Donde;

$h_5$  y  $h_6$  : Entalpías del lado de baja presión del regenerador.

$h_3$  y  $h_2$  : Entalpías del lado de alta presión del regenerador.

$C_{65}$  : Calor específico del isopentano del lado de baja presión.

$T_5$  y  $T_2$  : Temperaturas de entrada del isopentano al regenerador.

$$\varepsilon_{reg} = \frac{(648,52 - 643,60)KJ/Kg}{(2,29 KJ/Kg \cdot K) \cdot (354,41 - 312,06)K}$$

$$\varepsilon_{reg} = 5,07\%$$

Al ser el regenerador el mismo tipo de intercambiador que el recuperador (evaporador) la relación de la eficiencia con el  $NUT_{reg}$  y  $C_{r,reg}$  es la misma (2):

$$\varepsilon_{reg} = 2 \times \left\{ 1 + C_{r,reg} + (1 + C_{r,reg}^2)^{1/2} \right. \\ \left. \times \frac{1 + \exp[-NUT(1 + C_{r,reg}^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NUT(1 + C_{r,reg}^2)^{1/2}]} \right\}^{-1} \quad \text{Ec. 3. 14}$$

Al introducir esta ecuación se añaden nuevas incógnitas que se resolverán a continuación con estas ecuaciones:

$$C_{reg;a} = \dot{m}_o \cdot c_{23} \quad \text{Ec. 3. 15}$$

$$C_{reg;b} = \dot{m}_o \cdot c_{65} \quad \text{Ec. 3. 16}$$

$$C_{r;reg} = \frac{\min (C_{reg;a}; C_{reg;b})}{\max (C_{reg;a}; C_{reg;b})} \quad \text{Ec. 3. 17}$$

Donde;

$C_{reg;a}$  : Capacitancia térmica del lado de alta presión.

$C_{reg;b}$  : Capacitancia térmica del lado de baja presión.

$C_{r;reg}$  : Relación de capacidad del regenerador.

$c_{23}$  : Calor específico en el lado de alta presión.

$c_{65}$  : Calor específico en el lado de baja presión.

$$C_{reg;a} = 62,74 \left[ \frac{Kg}{s} \right] \cdot 2,535 \left[ \frac{KJ}{Kg \cdot K} \right]$$

$$C_{reg;a} = 159,04 \frac{Kw}{K} = 159046 \frac{W}{K}$$

$$C_{reg;b} = 62,74 \left[ \frac{Kg}{s} \right] \cdot 2,33 \left[ \frac{KJ}{Kg \cdot K} \right]$$

$$C_{reg;b} = 146,18 \frac{Kw}{K} = 146184 \frac{W}{K}$$

$$C_{r;reg} = \frac{146184}{159046} = 0,91$$

$$\therefore NUT_{reg} = 0,06$$

Una vez obtenido el  $NUT_{reg}$  se calcula el  $UA_{reg}$ :

$$NUT_{reg} = \frac{UA_{gec}}{\min(C_{reg;a}; C_{reg;b})}$$

Donde;

$NUT_{reg}$  : Número de unidades de transferencia del regenerador.

$UA_{reg}$  : Coeficiente global de transferencia de calor del regenerador.

$$UA_{reg} = NUT_{reg} \times \min(C_{reg;a}; C_{reg;b})$$

$$UA_{reg} = 0,06 \times 146184$$

$$UA_{reg} = 8771,04$$

### 3.8.4 BOMBA DEL ORC

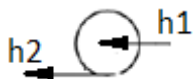


FIGURA 3. 10 Regenerador

**Fuente:** Propia

Las bombas son elementos capaces de comprimir el fluido a altas presiones, con la condición de que sea completamente líquido. Requieren que se suministre un trabajo desde una fuente externa a través de un eje giratorio. Las ecuaciones que define el trabajo suministrado así como los estados termodinámicos la entrada y a la salida de la bomba son las siguientes:

$$\eta_B = \frac{v_{12}(P_2 - P_1)}{h_2 - h_1} \quad \text{Ec. 3. 18}$$

Donde:

$\eta_B$  : Rendimiento isentrópico de la bomba

$v_1$  : Volumen específico del isopentano a la entrada de la bomba

$h_2$  y  $h_1$  : Entalpía del isopentano a la salida y entrada de la bomba

$P_2$  y  $P_1$  : Presión del isopentano a la salida y entrada de la bomba

$$\dot{W}_B = \dot{m}_{iso} \cdot v_{iso} \cdot (P_2 - P_1)$$

Donde:

$W_B$  : Potencia de la bomba [kw]

$\dot{m}_{iso}$  : Flujo másico del isopentano [Kg/s]

$v_{iso}$  : Volumen específico del isopentano en la bomba [ $m^3/kg$ ]

$P_1$  : Presión después de la bomba [kPa]

$P_2$  : Presión antes de la bomba [kPa]

$$\dot{W}_B = 62,74 \frac{Kg}{s} \times 0,002375 \frac{m^3}{kg} \cdot (1066,54 - 142,69) Kpa$$

$$\dot{W}_B = 137,66 Kw = 0,138 Mw$$

### 3.8.5 CIRCUITO DE CONDENSACIÓN

Para lograr condensar el isopentano en el condensador del Ciclo Rankine Orgánico se tiene previsto utilizar agua fría a través del circuito de condensación, la cual se hará a través del equipo identificado como “Chiller”, este equipo requiere transferir temperatura al agua, para lograr la condensación del isopentano.

#### 3.8.5.1 CONDENSADOR

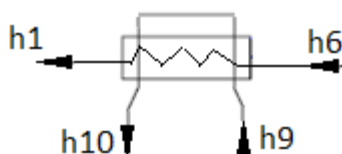


FIGURA 3. 11 Regenerador

**Fuente:** Propia

El condensador es un intercambiador de calor donde el isopentano va a condensar gracias a la transferencia de calor al flujo de agua fría que circula por él.

Es importante controlar que el isopentano llegue a la bomba con cierto margen respecto a la zona de vapor húmedo dado que la entrada de vapor de la bomba presentaría un mal funcionamiento y un desgaste precipitado de la

misma. Teniendo esto en cuenta, se muestra las ecuaciones que derivan del uso del condensador:

$$\varepsilon_{cond} = \frac{(T_{10} - T_9)}{(T_{cond} - T_9)} \quad \text{Ec. 3. 19}$$

Donde;

$T_{cond}$  : Temperatura de condensación del isopentano

$\varepsilon_{cond}$  : Efectividad del condensador

$T_{10}$  y  $T_9$  : Temperatura de salida y entrada del agua.

$$\varepsilon_{cond} = \frac{322,02 - 288,15}{345 - 288,15}$$

$$\varepsilon_{cond} = 0,59 = 59\%$$

Relación de eficiencia con el  $NUT_{cond}$ :

$$\eta_{cond} = 1 - e^{[-NUT_{cond}]} \quad \text{Ec. 3. 20}$$

$$0,59 = 1 - e^{[-NUT_{cond}]}$$

$$NUT_{cond} = 0,89$$

Cálculo de UA:

$$C_{cond;a} = \frac{m_{iso} (h_6 - h_1)}{(T_{sa} - T_{ea})} \quad \text{Ec. 3. 21}$$

$$NUT_{cond} = \frac{UA_{cond}}{C_{cond;a}} \quad \text{Ec. 3. 22}$$

Donde;

$NUT_{cond}$  : Número de unidades de transferencia del condensador

$C_{cond;a}$  : Capacitancia térmica del agua en el condensador

$UA_{cond}$  : Coeficiente global de transferencia de calor del condensador

$$C_{cond;a} = \frac{62,74 \text{Kg/s} (643,69 - 227,37) \text{KJ/Kg}}{(322,02 - 288,15) \text{K}}$$

$$C_{cond;a} = 771,18$$

Por lo tanto;

$$UA_{cond} = (771,18) 0,89$$

$$UA_{cond} = \mathbf{686,35}$$

### 3.8.5.2 Bomba del Circuito de Condensación

Recircula el agua dentro del Circuito de Condensación para poder enfriar el fluido orgánico (isopentano), se utiliza la misma ecuación 1.2, para el agua.

$$\dot{W}_{B,cond} = \dot{m}_{agua} \cdot v_{agua} \cdot (P_{salida} - P_{entrada})$$

$$\dot{W}_{B,cond} = 176,9 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \times 0,001285 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} (308,17 - 239,22) \text{Kpa}$$

$$\dot{W}_{B,cond} = \mathbf{15,67 \text{Kw} = 0,016 \text{MW}}$$

### 3.8.5.3 Chiller

Un Chiller es una máquina que extrae el calor de un líquido a través de una compresión de vapor o ciclo de refrigeración por absorción. Este líquido puede circular a través de un intercambiador de calor para enfriar el aire o el equipo según sea necesario.

$$\dot{W}_{chiller} = \dot{m}_{agua} \cdot C_{p_{agua}} \cdot (T_{ea} - T_{sa})$$

$$\dot{W}_{chiller} = 176,9 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \times 4,22 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \times (321,88 - 287,99) \text{K}$$

$$\dot{W}_{chiller} = \mathbf{25299,5 \text{Kw} = 2,5 \text{Mw}}$$

### 3.8.6 TRABAJO NETO DEL CICLO

El trabajo del neto del ciclo se obtiene como la diferencia entre el trabajo generado por la turbina y el consumido en la bomba. Esto es el flujo de

isopentano multiplicado por la diferencia de las diferencias entre salida y entrada de ambos elementos.

$$\dot{W} = \dot{m}_{iso} [(h_4 - h_5) - (h_2 - h_1)] \quad \text{Ec. 3. 23}$$

Donde:

$\dot{m}_{iso}$  : Flujo del isopentano por el ciclo

$h_4$  y  $h_5$  : Entalpía del isopentano a la entrada y salida de la turbina

$h_2$  y  $h_1$  : Entalpía del isopentano a la salida y entrada de la bomba

$$\dot{W} = 62,74 \frac{Kg}{s} \times [(698,36 - 648,13) - (230,647 - 227,365)] KJ/Kg$$

$$\dot{W} = 2945,2 Kw = 2,9 Mw$$

Para el cálculo del rendimiento se calcula la energía que recibe el ciclo por el recuperador. Esto es:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{iso} [(h_4 - h_3)] \quad \text{Ec. 3. 24}$$

$$\dot{Q} = 62,74 Kg/s \times (698,36 - 234,47) KJ/Kg$$

$$\dot{Q} = 29104,5 Kw = 29 Mw$$

Una vez obtenido el calor aportado el rendimiento del ciclo se calcula como:

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}} \quad \text{Ec. 3. 25}$$

Donde:

$\eta$  : Rendimiento del ciclo OCR

$\dot{W}$  : Potencia neta desarrollada por el ciclo

$\dot{Q}$  : Potencia calorífica procedente del recuperador (evaporador)

$$\eta = \frac{2,9}{29} = 10\%$$

### 3.8.7 CALCULO DE LMTD

Para el cálculo del LMTD y facilitar la visibilidad se basará en la Figura 3.4, el cual nos indica la configuración del ORC, tomando las temperaturas de los puntos mencionados en dicha figura.

#### 3.8.7.1 Pre-calentador (Regenerador)

Para el cálculo de LMTD, del pre-calentador se basará en la Ec.

$$LMTD_{reg} = \frac{(T_5 - T_3) - (T_6 - T_2)}{\ln \left[ \frac{(T_5 - T_3)}{(T_6 - T_2)} \right]} \quad \text{Ec. 3. 26}$$

$$LMTD_{reg} = \frac{(T_5 - T_3) - (T_6 - T_2)}{\ln \left[ \frac{(T_5 - T_3)}{(T_6 - T_2)} \right]}$$

$$LMTD_{reg} = \frac{(83,26^\circ\text{C} - 40,52^\circ\text{C}) - (82,26^\circ\text{C} - 38,921^\circ\text{C})}{\ln \left[ \frac{(83,26^\circ\text{C} - 40,52^\circ\text{C})}{(82,26^\circ\text{C} - 38,921^\circ\text{C})} \right]}$$

$$LMTD_{reg} = 43,03^\circ\text{C}$$

#### 3.8.7.2 Recuperador (Evaporador)

Para el cálculo de LMTD, del recuperador se basará en la Ec.

$$LMTD_{rec} = \frac{(T_8 - T_4) - (T_7 - T_3)}{\ln \left[ \frac{(T_8 - T_4)}{(T_7 - T_3)} \right]} \quad \text{Ec. 3. 27}$$

$$LMTD_{rec} = \frac{(163,66^\circ\text{C} - 119,44^\circ\text{C}) - (87,77^\circ\text{C} - 40,52^\circ\text{C})}{\ln \left[ \frac{(163,66^\circ\text{C} - 119,44^\circ\text{C})}{(87,77^\circ\text{C} - 40,52^\circ\text{C})} \right]}$$

$$LMTD_{rec} = 40,52^\circ\text{C}$$



### 3.8.7.3 Condensador

Para el cálculo de LMTD, del condensador se basará en la Ec.

$$LMTD_{cond} = \frac{(T_1 - T_9) - (T_6 - T_{10})}{\ln \left[ \frac{(T_1 - T_9)}{(T_6 - T_{10})} \right]} \quad \text{Ec. 3. 28}$$

$$LMTD_{cond} = \frac{(38,23^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) - (81,25^\circ\text{C} - 48,88^\circ\text{C})}{\ln \left[ \frac{(38,23^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C})}{(81,25^\circ\text{C} - 48,88^\circ\text{C})} \right]}$$

$$LMTD_{cond} = 27,54^\circ\text{C}$$

### 3.8.8 RESUMEN POTENCIA DE CADA ELEMENTO DEL ORC

Para enfocar de mejor manera los resultados de los cálculos, en la Tabla 3.7 se enlista una valoración para el interés del proyecto, en la que se funciona el Circuito de Aceite Térmico, El Ciclo Rankine Orgánico y el Circuito de Condensación.

TABLA 3. 7 Resultados de las Potencias de cada equipo en ORC y Circuito de Condensación. Flujo másico de cada líquido de Trabajo

EQUIPO	POTENCIA ELECTRICA (MW)	Numeración en NPF
<b>Ciclo Rankine Orgánico</b>		
Turbina	<b>3,16</b>	G-1170 C
Intercambiador de Calor (Evaporador)	13	E-1404
Intercambiador de Calor (Condensador)	26,11	E-1304
Bomba ORC	0,14	P-1064 C
Intercambiador de Calor (Pre-Calentador)	0,24	E-1604

<b>Circuito de Condensación</b>		
Bomba	0,016	P-1090
Chiller	25,3	E-1504
<b>Flujo Másico</b>		
<b>Isopentano</b>	62,74 Kg/s	
<b>Aceite Térmico</b>	166,15 Kg/s	
<b>Agua</b>	176,9 Kg/s	

### **3.9 OPERACIÓN**

La Operación y Control que se describe a continuación, cubre las actividades normales para el aprovechamiento del calor de los gases de combustión de los equipos de Generación de la NPF (Facilidades de Producción Norte).

La operación del Ciclo Rankine Orgánico será supervisada desde la sala de control de la Estación NPF (Control Room) el cual será realizado de manera automática con instrumentos y sistemas de control electrónicos, se tendrá información remota de las variables de presión y temperatura del proceso y de las variables de operación de la turbina.

Los P&IDs los cuales son diagramas que indican el proceso que sigue un fluido por medio de la tubería, y en ellos se enmarcan todos los cambios que se hacen dentro de la planta, y a continuación para la operación se basa en la explicación mediante la lectura de P&ID's, introduciendo controles automáticos en base a la necesidad de la temperatura como Transmisores de temperatura, cierre y apertura de válvulas. Ver Anexos de planos.

#### **3.9.1 MANEJO DEL ACEITE TÉRMICO**

Dentro del Anexo de planos, que hace referencia al proceso del aceite térmico, está bajo la numeración 100-082-131-1, indicando el camino por la tubería que va a seguir para poder cerrar el circuito.

El aceite térmico proveniente de los recuperadores de calor H-1072 A/B llega al cabezal y se distribuye el aceite hacia los intercambiadores existentes (E-

1204, E-1104 y E-1060 A/B) por las tuberías de 8", respectivamente y hacia los tanques T-1108 A/B, T-1115/B a través de las tuberías de 3" y 2", respectivamente. Desde el cabezal dado por una tubería de 12" se conectará la nueva línea hacia el proceso Ciclo Rankine Orgánico (ORC).

### **3.9.2 MANEJO DENTRO DEL CICLO RANKINE ORGÁNICO**

Los PI&D's presentados en los anexos de Planos indican el proceso con la operación de la Bomba; en el P&ID GEN-082-002-1 el líquido isopentano proveniente del condensador E-1404 va a través de la tubería de 16" donde se tiene un indicador de presión (PI) y pasa hacia el cabezal, a la succión de la bomba P-1064C.

A la descarga de la bomba P-1064C, se tiene un indicador de presión (PI) y una válvula check (FSV). El líquido proveniente de la Bomba P-1064C ingresa en el pre-calentador E-1604, por medio de la tubería de 8", la cual tiene instalado un transmisor de temperatura (TT) e indicador de presión (PI), por aquí existirá un cambio de calor con el mismo isopentano, el cual por un lado se calentará el líquido debido a los gases que salen de la Turbina G-1170C.

Este líquido isopentano ya pre-calentado ingresa al recuperador (evaporador) a través de la tubería de 8" la cual tiene instalado un transmisor de temperatura (TT) y un indicador de presión (PI); el fluido pasa hacia los tubos del intercambiador y sale por la tubería de 12", ésta tubería tiene instalado los siguientes instrumentos: un transmisor de presión (PT) y un transmisor de temperatura (TT) que permite con el controlador TIC regular la apertura de la válvula de control de temperatura (TV).

El gas proveniente del recuperador (evaporador) E-1304 entra a la turbina a través de la tubería de 12", en esta tubería se tiene instalada una válvula de control de flujo (FC) y sale por la tubería 30".

Las turbinas tienen instalados la siguiente instrumentación: un indicador de presión (PI), un indicador de temperatura (TI), un indicador de nivel (LG), un controlador de nivel (LC) y un indicador de velocidad (SI).

Este equipo cuenta con la instrumentación y un panel de control definido por el proveedor del skid, que permite la comunicación, el accionamiento remoto y el monitoreo del estado desde el sistema de control de la estación.

### **3.9.3 MANEJO DEL CIRCUÍTO DE CONDENSACIÓN**

Para guiarse en este manejo se debe dirigir al Anexo de planos, en el P&ID GEN-082-002-2. El gas proveniente de la turbina G-1170C pasa hacia el recuperador (evaporador) E-1404 a través de la tubería 30" la cual tiene instalado un indicador de temperatura (TI); el fluido pasa hacia los tubos del intercambiador ó condensador y sale por la tubería 16".

El agua entra por la carcasa a través de la tubería 10", esta tubería tiene instalado un indicador de temperatura (TI) y sale hacia el chiller E-1504 a través de la tubería 10".

El agua proveniente del Condensador E-1404 a través de la tubería 10 pasa a un chiller E-1504 para lograr enfriar la corriente de agua, este fluido entra a través de la tubería 10" y sale por la tubería 16", esta tubería tiene instalado un indicador de temperatura (TI).

Estos últimos equipos mencionados cuentan con la instrumentación y un panel de control definido por el proveedor del skid, que permite la comunicación, el accionamiento remoto y el monitoreo del estado desde el sistema de control de la estación.

El líquido proveniente del chiller E-1504 pasa a las bomba P-1090 A por el cabezal 16" este cabezal tiene un indicador de presión (PI). A la descarga de las bombas P-1090 A, en la tubería 10" tiene un indicador de presión (PI) y una válvula check (FSV).

Las bombas cuentan con un hand switch para encender o apagar la bomba.

### **3.10 PÉRDIDAS DE CARGA**

Con objeto de optimizar dichos valores se calcula, con ayuda de HYSYS, la sensibilidad de las prestaciones del ciclo respecto a las pérdidas de carga. Se hace el estudio de las pérdidas de carga frente a la potencia total generada por el ciclo. Se observa que unas pérdidas de carga influyen mucho en la

potencia del ciclo y otras no tanto. Teniendo en cuenta la configuración del ciclo y este análisis de sensibilidad se concluye:

En las pérdidas de presión en los tramos de alta se distinguen un solo caso la cual es la pérdida de carga en los intercambiadores, existiendo pérdidas en la parte de alta presión de los intercambiadores de 0,0345 Mpa.

### **3.11 REDUCCIÓN DE EMISIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN**

#### **3.11.1 CONSIDERACIONES PREVIAS AL ANÁLISIS DE REDUCCIÓN DE CO<sub>2</sub>**

Uno de los principales causantes del calentamiento global son las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera que producen las distintas actividades de los seres humanos.

En este apartado se harán cálculos de la reducción de emisiones que puede esperarse cuando se haya implementado el Ciclo Rankine Orgánico, relacionados, primero con la potencia hallada a la salida de la turbina del ORC, y la segunda relación en función al diesel que se consume para el funcionamiento de la Turbina LM 2500.

#### **3.11.2 CANTIDAD TOTAL DE CONSUMO DE DIESEL Y EMISIONES DE CO<sub>2</sub> EN NPF**

En la Tabla 3.8 se identifica en que valores se encuentra trabajando actualmente los recuperadores H-1072A/B.

TABLA 3. 8 Máximo trabajo posible de los Recuperadores

<b>RECUPERADOR</b>	<b>POTENCIA</b>	<b>TEMPERATURA</b>
H-1027 A	15 MW	163,3°C
H-1027 B	11 MW	134°F

Se hace un promedio entre la potencia de las dos turbinas, y se puede decir que ambas trabajan a 13MW.

En lo que respecta al consumo de Diesel se reporta en REPSOL, por cada MW se consume 47 BPD de Diesel, este último datos se evaluó en un promedio del año 2011, como se observa en la Gráfica 3.7, y estos datos serán de mucha importancia para lograr encontrar la reducción de emisión de gases de escape hacia el medio ambiente.

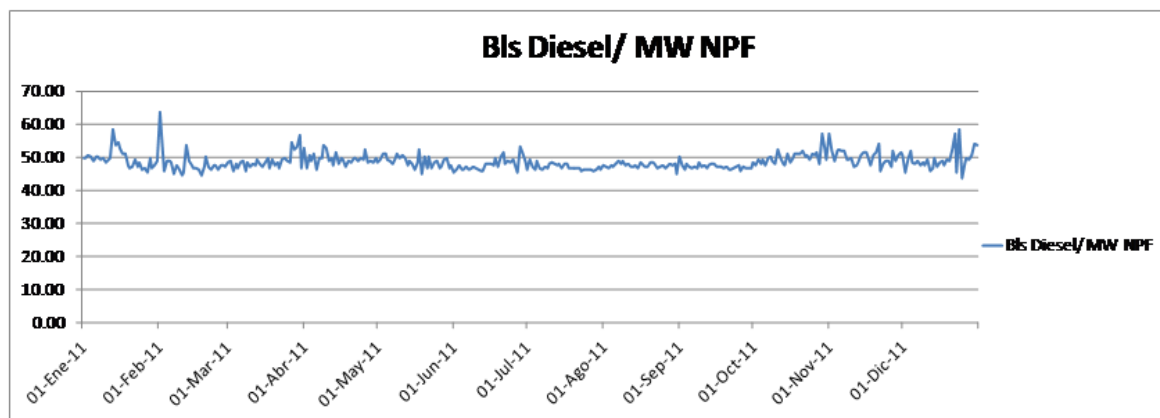


FIGURA 3. 12 Consumo de Diesel por cada Mw en NPF en el 2011

Fuente: (1)

$$\text{Consumo TOTAL de Diesel}_{H-1072A/B} = \text{Potencia}_{H-1072A/B} \times \text{Consumo por barril} \quad \text{Ec. 3. 29}$$

$$\text{Consumo TOTAL de Diesel}_{H-1072A/B} = 2(13\text{MW}) \times \left(47 \frac{\text{BPD}}{\text{MW}}\right)$$

$$\text{Consumo TOTAL de Diesel}_{H-1072A/B} = 1222 \text{ BPD}$$

$$\text{Consumo TOTAL de Diesel}_{H-1072A/B} = 446030 \frac{\text{Barriles}}{\text{Año}}$$

Se busca encontrar el ahorro en crudo. En la Planta Topping procesa el crudo extraído para poder producir diesel, se explica en un gráfico simple el proceso de producción del mismo:



FIGURA 3. 13 Esquema Sintetizado del proceso de la Planta Topping.

En dicho proceso, mediante estudios previos realizados, se halló que por cada barril de diesel procesado, es aproximadamente 1,3 barriles de crudo, por lo tanto el valor hallado en reducción de consumo de diesel, se deberá multiplicar por el factor 1,3 para encontrar el valor real de cantidad de crudo que se ahorrará REPSOL y éste a su vez se lo pueda vender.

$$\text{Consumo TOTAL de Crudo}_{H-1072A/B} = 446030 \frac{\text{Barriles}}{\text{Año}} \times 1.3$$

$$\text{Consumo TOTAL de Crudo}_{H-1072A/B} = 579839 \frac{\text{Barriles}}{\text{Año}}$$

### 3.11.3 DATOS ENCONTRADOS Y PROPIEDADES DEL DIESEL

Para realizar el cálculo de reducción de gases se ha basado en un artículo (11) , el cual redacta ejemplos prácticos que permite tener una idea del cálculo de las emisiones asociadas al consumo de energía, tanto en instalaciones fijas como de transporte.

Cabe indicar que los gases de combustión de gases están compuestos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). Pero para el interés del proyecto es primordial identificar cuanto de Dioxido de Carbono se reduce.

Los datos que se encontraron durante la implantación del ORC y además de propiedades físicas del diesel, se revelan a continuación.

$$\dot{W}_{Turb\ ORC} = 3162,47 \frac{KJ}{s} = 99700,1 \frac{GJ}{año}$$

---

<sup>(11)</sup> **Lutero, Canvi.** GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO. Cataluña : Version 11, 2011.

$$\text{Factor emisión Diesel} = 0,073 \frac{tCO_2e}{GJ} = 0,262 \frac{tCO_2e}{MWh}$$

$$\eta_{\text{Turbina LM 2500}} = 36,9\% = 0,369$$

$$\text{Poder Calorífico del Diesel} = 42,6 \frac{GJ}{ton}$$

$$\delta_{\text{Diesel}} = 843,5 \frac{Kg}{m^3}$$

### 3.11.4 CÁLCULO DE REDUCCIÓN EMISIONES DE CO2

#### 3.11.4.1 Escenario de emisiones sin el Proyecto ORC

Las emisiones de línea de base significa el escenario que se presenta actualmente con respecto a la contaminación de la planta NPF, como dato dado por REPSOL, se sabe que:

$$\text{Total de Combustión}_{\text{Turb LM 2500}} = 2795.190 \frac{GJ}{año}$$

El dato que se presento es lo que corresponde a todo el año 2011, y debidamente este valor se debe transformar a toneladas de CO2 para saber la cantidad de contaminación resulta sobre el medio ambiente, durante todo el año, cabe resaltar que la planta trabaja los 365 días del año.

$$\begin{aligned} \text{Contaminación Total} & \qquad \qquad \qquad \text{Ec. 3. 30} \\ & = \text{Total de Combustión}_{\text{Turb LM 2500}} \\ & \times \text{Factor emisión Diesel} \end{aligned}$$

$$\text{Contaminación Total} = 2795.190 \frac{GJ}{año} \times 0,073 \frac{tCO_2e}{GJ}$$

$$\text{Contaminación Total} = 204.049 \frac{tCO_2e}{año}$$

#### 3.11.4.2 Reducción de emisiones con la implementación del ORC

Al realizar la recuperación de calor mediante un ORC, se hallo una potencia por la turbina la cual va a generar energía eléctrica por medio de un



generador, por lo que esta cantidad de energía se podrá utilizar para reducir el consumo de Diesel en las Turbinas LM 2500, por lo que se tiene la siguiente ecuación:

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{DIESEL} \left( \frac{GJ}{año} \right) = \frac{\dot{W}_{Turb\ ORC}}{\eta_{Turb\ LM\ 2500}} \quad \text{Ec. 3. 31}$$

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{DIESEL} \left( \frac{GJ}{año} \right) = \frac{99700,1 \frac{GJ}{año}}{0,369}$$

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{DIESEL} \left( \frac{GJ}{año} \right) = 270190 \frac{GJ}{año}$$

$$REDUCCION DE CO2_{ORC} \quad \text{Ec. 3. 32}$$

$$= REDUC. CONSUMO_{DIESEL} \times \text{Factor emision Diesel}$$

$$REDUCCION DE CO2_{ORC} = 270190 \frac{GJ}{año} \times 0,073 \frac{tCO_2e}{GJ}$$

$$REDUCCION DE CO2_{ORC} = 19723,9 \frac{tCO_2e}{año}$$

#### 3.11.4.3 Ahorro de diesel

Una vez encontrado el valor de reducción de CO<sub>2</sub>, es importante hallar el beneficio ideal para REPSOL, el cual es consumir menos diesel para su generación eléctrica, es decir, la cantidad de diesel que llegue a reducirse por efecto del ORC servirá para poder comercializarlo, y con ello ganar mayor beneficio económico.

Es primordial encontrar los cálculos en unidades de medida de barriles por año, para dicho fin se utiliza el poder calorífico y densidad del diesel, aplicando directamente sobre el valor encontrado de la ecuación 3.28.

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{DIESEL} \left( \frac{GJ}{año} \right) = 270190 \frac{GJ}{año}$$

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{DIESEL} \left( \frac{m^3}{año} \right) = \frac{REDUCCIÓN CONSUMO_{DIESEL} \left( \frac{GJ}{año} \right)}{Poder Calórico del Diesel}$$

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{DIESEL} \left( \frac{m^3}{año} \right) = \frac{270190 \frac{GJ}{año}}{42,6 \frac{GJ}{ton}} = 6342,49 \frac{Ton}{año}$$

Ahora utilizando la densidad del diesel, y haciendo una conversión de unidades se tiene:

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{DIESEL} \left( \frac{m^3}{año} \right) = 6342,49 \frac{Ton}{año} \times \frac{1000kg}{1 ton} \times \frac{m^3}{843,5kg}$$

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{DIESEL} \left( \frac{m^3}{año} \right) = 7519,25 \frac{m^3}{año}$$

Se conoce además que 1 barril posee 0,159 m<sup>3</sup>; por lo tanto:

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{DIESEL} \left( \frac{barriles}{año} \right) = 7519,25 \frac{m^3}{año} \times \frac{1 barril}{0,159 m^3}$$

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{DIESEL} \left( \frac{barriles}{año} \right) = 47290,9 \frac{barriles}{año}$$

#### 3.11.4.4 Ahorro de Crudo

Finalmente, se busca encontrar el ahorro en crudo, para que dicha reducción, pueda ser vendido. En la Planta Topping procesa el crudo extraído para poder producir Diesel, se explica en la Figura 3.7

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{CRUDO} \left( \frac{barriles}{año} \right) = REDUCCIÓN CONSUMO_{DIESEL} \times 1,3 \quad \text{Ec. 3. 33}$$

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{CRUDO} \left( \frac{barriles}{año} \right) = 47290,9 \frac{barriles}{año} \times 1,3$$

$$REDUCCIÓN CONSUMO_{CRUDO} \left( \frac{barriles}{año} \right) = 61478,2 \frac{barriles}{año}$$

## **CAPÍTULO 4**

### **ESTUDIO ECONÓMICO DEL MODELO**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Uno de los objetivos del presente proyecto es realizar un estudio económico para analizar la factibilidad del mismo. Dicho estudio determinará si el presente proyecto es rentable económicamente, y por tanto si se lo puede realizar o no.

El análisis en el presente capítulo se lo divide en dos partes, la primera sección corresponde a tomar en cuenta los costos de inversión del sistema y en la segunda parte se estudia la rentabilidad del ORC en lo que respecta al ahorro de barriles de petróleo y consumo de energía eléctrica.

El presente proyecto busca analizar los beneficios energéticos y económicos que supone acoplar un ciclo ORC de recuperación de energía del aceite térmico y ceder hacia el isopentano.

#### **4.2 MODELO ECONÓMICO**

Para el cálculo de la viabilidad económica del modelo propuesto, se ha llevado a cabo un análisis económico basado en los parámetros técnicos de cada equipo empleado en el Ciclo Rankine Orgánico. En este análisis se calculará, para cada caso, la inversión inicial, los costos de mantenimiento y operación, a partir de los que se formará el costo de generación; posteriormente se obtendrán los índices de rentabilidad (VAN, TIR y PR).

El análisis financiero tiene como objetivos específicos, determinar las necesidades de inversión fija y capital de trabajo, determinar las necesidades de financiamiento y las condiciones en que se otorgará y amortizará el mismo, estimar los ingresos y egresos que tendrá el proyecto, establecer y estudiar los indicadores financieros que ayuden en la toma de decisiones.

Adicionalmente a estos cálculos, es importante saber cuál es la rentabilidad económica que resulta con el ahorro de crudo empleando el Ciclo Rankine Orgánico. Para con ello también obtener mayor beneficio en el campo económico para la REPSOL.

### 4.3 ANALISIS ECONÓMICO

La inversión engloba los gastos en compra de equipos, su instalación, el montaje de tuberías, instrumentación, parte eléctrica. Así como los costes en obra civil, trabajos de arquitectura y obras de infraestructura. También incluyen la ingeniería, supervisión del proyecto y beneficio para el constructor. No incluye costes del terreno ya que la superficie donde se va a construir es de la propia petrolera, no incurriendo en gastos adicionales.

### 4.4 COSTOS DEL PROYECTO

#### 4.4.1 COSTOS DIRECTOS EN EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN

En la siguiente tabla se detalla, la lista de equipos con sus respectivos costos en el mercado, es un estimado de costo de Clase V, el cual tiene una desviación de +30/-20%.

TABLA 4. 1 Lista de Precios de equipos del Ciclo Rankine Orgánico y Circuito de Condensación

EQUIPOS	CANITIDAD	COSTO UNITARIO [\$]	COSTO TOTAL [\$]
Turbina	1	4.852.868,75	4.852.868,75
Intercambiador de Calor (Evaporador)	1	61.323,48	61.323,48
Intercambiador de Calor (Condensador)	1	28.229,63	28.229,63
Bomba ORC	1	21.049,60	21.049,60
Chiller	1	108.681,73	108.681,73
Bomba (Circuito de Condensación)	1	24.085,60	24.085,60
Intercambiador de Calor (Regenerador)	1	24.965,60	24.965,60
<b>SUBTOTAL</b>			5.121.204,39
12% MONTAJE + TRANSPORTE			614.544,53
<b>TOTAL</b>			<b>5.735.748,92</b>

Como se analizó en el modo de operación es de vital importancia la instrumentación puesto que la ayuda de estos va a mantener controlado tanto presiones, temperaturas, niveles y caudales de los líquidos de trabajo; para el correcto funcionamiento del ORC, Circuito de Aceite Térmico y Circuito de Condensación.

Por ello en la siguiente tabla se enlista la instrumentación necesaria con sus respectivos precios en el mercado, de igual manera estos datos, se logró obtener de la base de datos de Repsol, con adquisiciones de instrumentación para otros proyectos.

TABLA 4. 2 Costos de Instrumentación (Tomados de base de datos SIGIN, REPSOL)

<b>Instrumentación</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario [\$]</b>	<b>Valor Total [\$]</b>
Indicador de Presiones (PI)	12	469,33	5.632
Válvulas Check (FSV)	4	1.056,00	4.224
Tubería 12"	250 [m]	44,00 [Usd/m]	11.000
Tubería 8"	250 [m]	44,00 [Usd/m]	11.000
Tubería 6"	250 [m]	44,00 [Usd/m]	11.000
Tubería 30"	150 [m]	73,33 [Usd/m]	11.000
Hand Switch	2	704,00	1.408
Transmisor de Temperatura (TT)	2	1.760,00	3.520
Transmisor de Presión (PT)	2	1.760,00	3.520
PLC + Tablero	1	22.000,00	2.2000
Válvulas de Alivio (PSV)	1	704,00	5.632
Válvula Volumen de Control	5	1.056,00	4.224
Indicador de Nivel	1	44,00	22.000
<b>SUBTOTAL</b>			<b>84.304</b>
12% IVA			10.116,48
<b>TOTAL</b>			<b>94.420,48</b>

#### 4.4.2 COSTOS MANO DE OBRA DIRECTA E INDIRECTA

Para poder encontrar el valor estimado de la inversión inicial, es importante también el costo que representa el diseño de la ingeniería, además de ello otros rubros como son mano de obra, gastos de administración.

Estos costos se dan para dar inicio al proyecto es decir, costos en el año uno. Y se presenta en la siguiente Tabla 4.3:

TABLA 4. 3 Costos Mano de Obra Directa e Indirecta

	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Horas Hombre [\$/HH]</b>	<b>Total</b>
Diseño de Ingeniería	2	40	146.831
Mano de Obra	20	20	250.000
Administrativos	2	35	14.683
<b>TOTAL</b>			<b>411.514</b>

## 4.5 EGRESOS

### 4.5.1 COSTOS OPERATIVOS

Una vez ya instalado el sistema de recuperación por medio de Ciclo Rankine Orgánico, durante su vida útil, con objeto de realizar los procesos de producción se debe realizar mantenimiento operativo periódicamente.

Cabe recalcar que la vida útil estimado para este proyecto es de 6 años, debido a que la operación del Bloque 16 en el Ecuador culmina en el año 2018, por el convenio pactado con el Gobierno del Ecuador.

En la siguiente tabla se ilustra el costo por mantenimiento y su respectiva mano de obra.

Conforme a los resultados previstos, si resulta positivo el análisis de factibilidad para la implantación del proyecto se tiene estimado instalar el mismo, al finalizar el 2012, pero que empiece su funcionamiento en el primer trimestre del 2013.

La Tabla 4.4 indica los egresos que tendrá el proyecto con el transcurso del tiempo después de su implementación, el mantenimiento con su respectiva mano de obra, y para cada año se ha evaluado una tasa de inflación del 2,5%.

TABLA 4. 4 Costos Operativos, para vida útil de 6 años

<b>Año</b>	<b>Costo Mantenimiento [\$]</b>	<b>Costo Mano de Obra [\$]</b>	<b>TOTAL</b>
2013	50.000	20.000	70.000
2014	51250	20.500	71.750
2015	52.531,25	21.012,5	73.544
2016	53.844,53	21.537,81	75.382
2017	55.190,64	22.076,25	77.267
2018	56570,4	22628,16	79.199

#### **4.6 VALOR DE SALVAMENTO**

El valor de salvamento, es el valor que tiene o representa un bien al terminar su vida útil, es decir el valor que representaría los equipos al cesar el servicio del Ciclo Rankine Orgánico, para el que fue creado. Para el presente proyecto es igual a \$0,00 puesto que las instalaciones quedan a nombre del Gobierno del Ecuador y no para intereses de REPSOL.

#### **4.7 INGRESOS (I)**

Prácticamente los ingresos vienen determinados por el ahorro que se tiene al no utilizar Diesel como combustible sobre el proyecto a implantarse, en el apartado 3.11 se explicó el cálculo de la reducción del consumo de crudo, obteniendo un resultado de ahorro de 61478,2 Barriles de crudo por año, y esto se pretende vender, resultando un ingreso económico para REPSOL

Por información recibida por REPSOL, el precio del barril del Crudo asciende a 36,72 USD, por lo tanto se aplica el siguiente análisis para obtener el ingreso anual:

$$\text{Ahorro Crudo}_{ANUAL}[\$] = \text{Reducción Consumo}_{DIESEL} * \text{Precio Barril}$$

$$\text{Ahorro Crudo}_{ANUAL}[\$] = 61478,2 \frac{\text{bbl}}{\text{año}} \times 36,72 \frac{\text{USD}}{\text{bbl}}$$

$$\text{Ahorro Crudo}_{ANUAL}[\$] = 2'247.479,5 \frac{\text{USD}}{\text{anuales}}$$

## 4.8 ANÁLISIS FINANCIERO

En el análisis financiero del proyecto, se procederá a emplear el método tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo y pueden ser:

- Valor Anual Neto [VAN]
- Tasa interna de Retorno [TIR]

### 4.8.1 FLUJO DE CAJA

### 4.8.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE EFECTIVOS

Un diagrama de flujo de efectivo es una representación gráfica de los flujos de efectivo trazados en una escala de tiempo. El diagrama, que representa una nueva determinación de la situación, incluye lo que se conoce y que se necesita. A lo largo de este texto una flecha vertical que señale hacia arriba indicará un flujo efectivo positivo, en sentido contrario, indicará un flujo efectivo negativo. (7). Para el proyecto se tiene:

- El ingreso, la tarifa para el año 2012 es de 36,72 \$/bl y desde el 2013 la inflación anual es del 1,25%.
- El egreso también irá creciendo de acuerdo a la inflación, para el presente caso la inflación es del 2,5%.
- La inversión inicial en el año 0, se contabilizó con el valor de \$6'241.683,4USD.

---

(7) **LELAND BLANK, ANTHONY TARQUIN**; Ingeniería Económica; Mac Graw-Hill, 2004.



- Se debe considerar una tasa de descuento (tasa impositiva) que se aplica hacia REPSOL la cual es alrededor del 15% por cada 100 dólares ganados.

El 15% aplicados se divide de la siguiente manera: el 3% para los trabajadores y un 12% para las comunidades indígenas que colindan con el Bloque 16.

- Además se debe aplicar una depreciación del equipo, que resulte que para cada 5 años se tenga que realizar un cambio en cualquier parte del equipo en un valor de \$ 2'500.000 USD
- Impuestos a REPSOL si se obtiene ganancias.

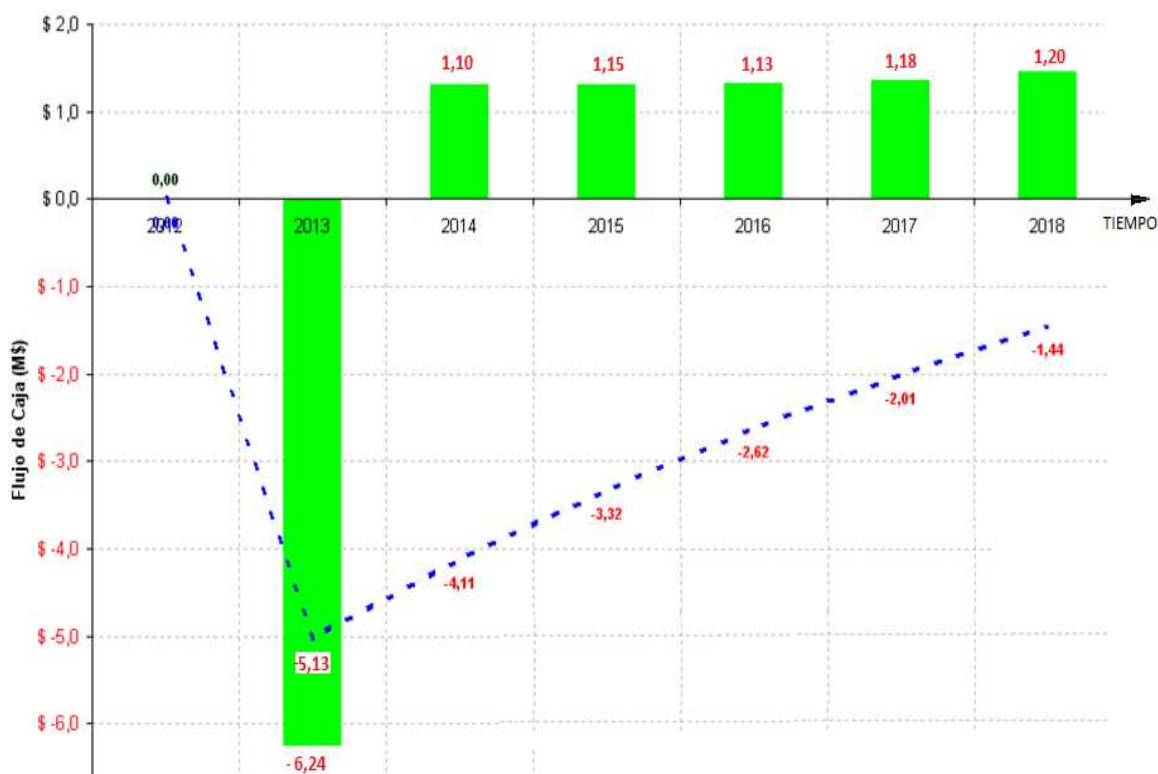


FIGURA 4. 1 Diagrama de Flujo de Caja

**Fuente:** Propia

### 4.8.3 DIAGRAMA DE FLUJO DE CAJA EN EXCEL

En la siguiente tabla realizada en Excel se observa, los valores de ingresos, además los valores de egresos, que se estima para cada año, obteniendo un flujo de caja, para poder realizar los cálculos del VAN y TIR:

Tabla 4. 5 Flujo de Caja Efectivo

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>Año</b>	<b>Tasa Impositiva</b>	<b>Inversión</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Depreciación</b>	<b>Gastos Operativos</b>	<b>Impuestos</b>	<b>Flujo de Caja</b>
2	2013	34%	-6241683,4	2247479,5	-500000	-70.000	-572245,2918	-5.136.449
3	2014	34%		2247479,5	-500000	-71.750	-571648,3073	1.104.081
4	2015	33%		2275572,994	-500000	-73.544	-566243,003	1.135.786
5	2016	33%		2304017,656	-500000	-75.382	-575094,4962	1.153.541
6	2017	32%		2332817,877	-500000	-77.267	-569219,848	1.186.331
7	2018	32%		2361978,1	-500000	-79.199	-578048,4333	1.204.731

### 4.8.4 VALOR NETO ACTUAL

Para poder hallar el VAN se necesita saber, el TMAR. Para REPSOL se maneja un TMAR del 19,19%, y en base a los datos hallados del valor neto del flujo de caja, con lo explicado se aplica la Ec. 1.13.

$$VAN = -I_{flujo\ de\ caja} + \left(\frac{Q_1}{(1+i)^{n-1}}\right) + \left(\frac{Q_1}{(1+i)^{n-2}}\right) + \dots + \left(\frac{Q_1}{(1+i)^n}\right)$$

$$VAN = -5.136.449 + \left(\frac{1.104.081}{(1+0,1919)^1}\right) + \left(\frac{1.135.786}{(1+0,1919)^2}\right) + \left(\frac{1.153.541}{(1+0,1919)^3}\right)$$

$$+ \left(\frac{1.186.331}{(1+0,1919)^4}\right) + \left(\frac{1.204.731}{(1+0,1919)^5}\right)$$

$$VAN = \$ - 1'640.716,91 Usd$$

Si se trabaja con el programa Excel, una vez hallado el flujo de caja, como se observa en la Tabla 4.5, se aplica directamente la fórmula financiera del VAN.

Luego de ello se aplica el TMAR con el que se necesita trabajar, luego la suma de las celdas del flujo de caja, para el caso actual desde la celda H3 hasta la celda H8, y finalmente se suma la inversión (negativa), que para el caso corresponde a la celda H2; lo explicado, se hace referencia en la Tabla 4.6:

Tabla 4. 6 Cálculo del VAN en Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>Año</b>	<b>Tasa Impositiva</b>	<b>Inversión</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Depreciacion</b>	<b>Gastos Operativos</b>	<b>Impuestos</b>	<b>Flujo de Caja</b>
2	2013	34%	-6241683,4	2247479,5	-500000	-70.000	-572245,2918	-5.136.449
3	2014	34%		2247479,5	-500000	-71.750	-571648,3073	1.104.081
4	2015	33%		2275572,994	-500000	-73.544	-566243,003	1.135.786
5	2016	33%		2304017,656	-500000	-75.382	-575094,4962	1.153.541
6	2017	32%		2332817,877	-500000	-77.267	-569219,848	1.186.331
7	2018	32%		2361978,1	-500000	-79.199	-578048,4333	1.204.731
8								
9							<b>VAN</b>	<b>(\$ 1.640.716,79)</b>

#### 4.8.5 TASA DE INTERES DE RETORNO (TIR)

Para poder encontrar el TIR, se debe igualar a cero el Valor Actual Neto (VAN=0), de esta manera se comprueba efectivamente que el proyecto es rentable.

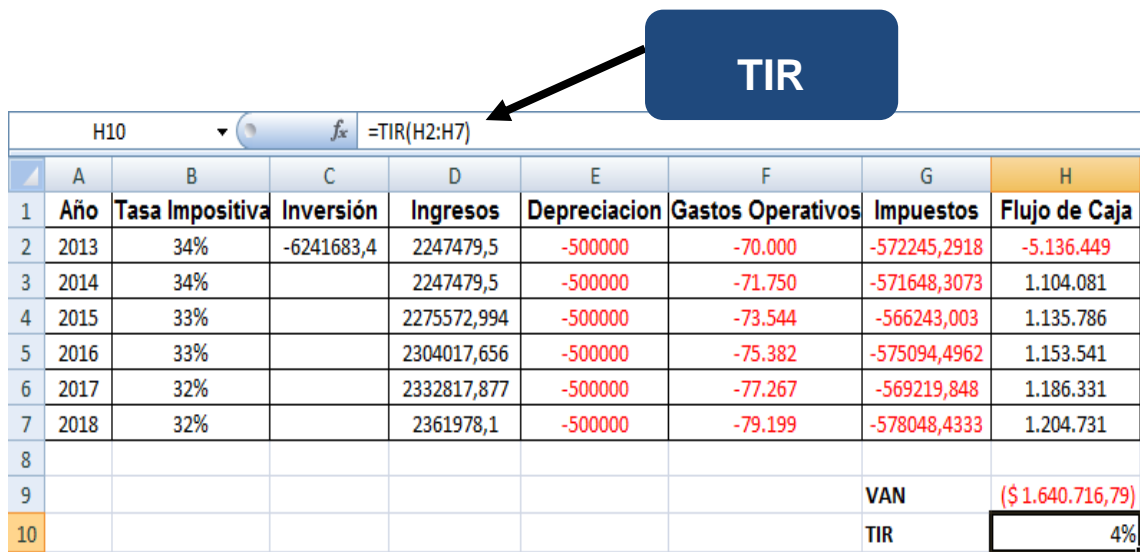
$$VAN = -I + \left( \frac{Q_1}{(1+i)^{n-1}} \right) + \left( \frac{Q_1}{(1+i)^{n-2}} \right) + \dots + \left( \frac{Q_1}{(1+i)^n} \right) = 0$$

$$-5.136.449 + \left( \frac{1.104.081}{(1+i)^1} \right) + \left( \frac{1.135.786}{(1+i)^2} \right) + \left( \frac{1.153.541}{(1+i)^3} \right) + \left( \frac{1.186.331}{(1+i)^4} \right) + \left( \frac{1.204.731}{(1+i)^5} \right) = 0$$

$$i = 0,04 = 4\%$$

Si se trabaja con el programa Excel, una vez hallado el flujo de caja, como se observa en la FIGURA 4.5, se aplica directamente la fórmula financiera del TIR, luego la suma de las celdas del flujo de caja, para el caso actual desde la celda H2 hasta la celda H7; lo explicado, se hace referencia en la Tabla 4.7:

Tabla 4. 7 Cálculo del TIR en Excel.



	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>Año</b>	<b>Tasa Impositiva</b>	<b>Inversión</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Depreciacion</b>	<b>Gastos Operativos</b>	<b>Impuestos</b>	<b>Flujo de Caja</b>
2	2013	34%	-6241683,4	2247479,5	-500000	-70.000	-572245,2918	-5.136.449
3	2014	34%		2247479,5	-500000	-71.750	-571648,3073	1.104.081
4	2015	33%		2275572,994	-500000	-73.544	-566243,003	1.135.786
5	2016	33%		2304017,656	-500000	-75.382	-575094,4962	1.153.541
6	2017	32%		2332817,877	-500000	-77.267	-569219,848	1.186.331
7	2018	32%		2361978,1	-500000	-79.199	-578048,4333	1.204.731
8								
9							<b>VAN</b>	<b>(\$ 1.640.716,79)</b>
10							<b>TIR</b>	<b>4%</b>

FUENTE: PROPIA

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA

#### 5.1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se realiza un análisis técnico y económico con los resultados obtenidos en los cálculos del capítulo 4 y 5, en los cuales se detalla primero encontrar los beneficios energéticos al momento de acoplar un ciclo ORC de recuperación de energía, mediante el isopentano, sobre el circuito de aceite térmico. Segundo la viabilidad económica en el aspecto de rentabilidad.

#### 5.2 RESULTADOS TÉCNICOS

##### 5.2.1 PUNTO NOMINAL O PUNTO DE DISEÑO

En la Figura 5.1 se representa el ciclo de potencia sobre el diagrama T-s del isopentano. En él aparecen señalados cada uno de los puntos del ciclo, para su mejor comprensión se adjunta también el esquema de planta en la Figura 5.2.

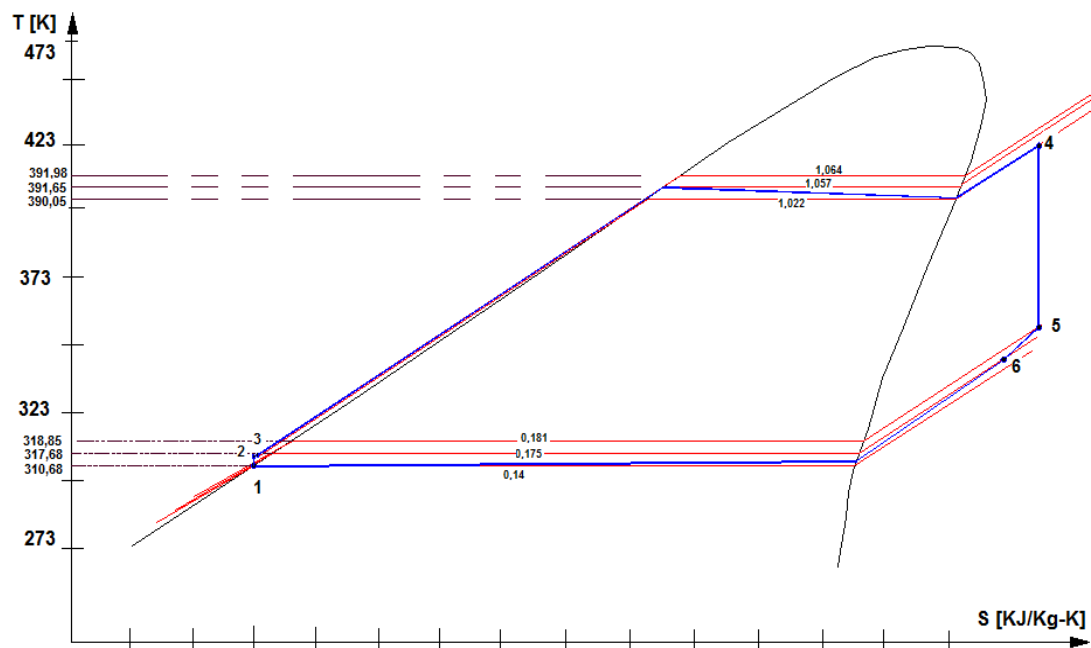


FIGURA 5. 1Ciclo de Potencia sobre el Diagrama T vs S

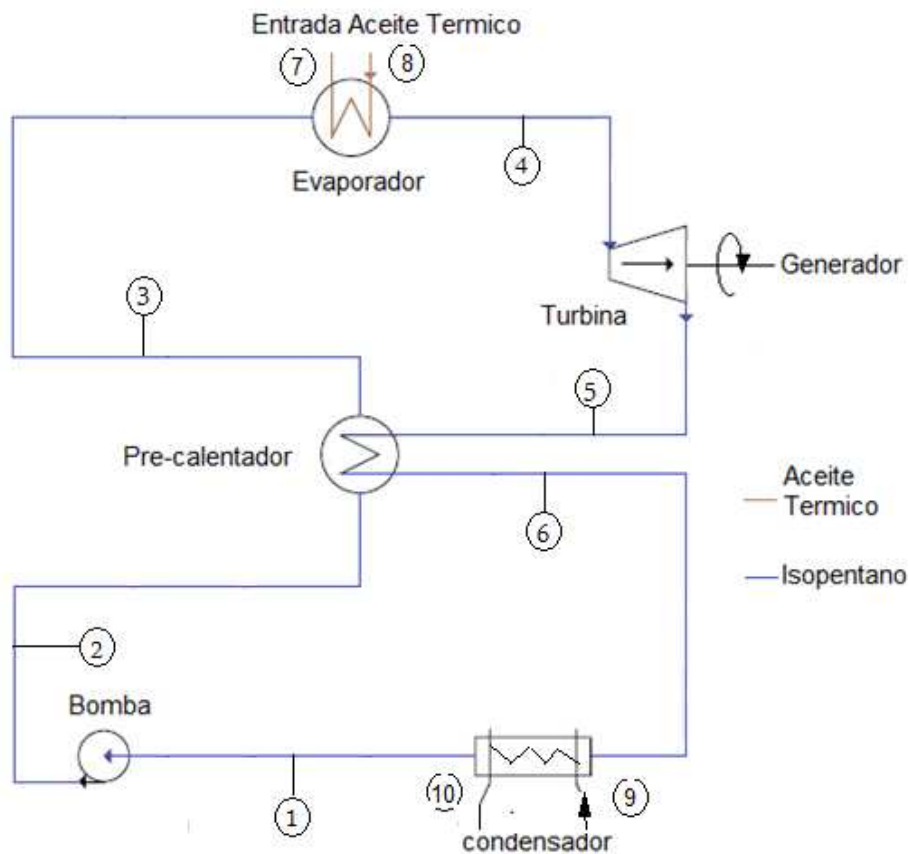


FIGURA 5. 2 Esquema final a implementarse sobre el Circuito de Aceite Térmico

También se adjuntan las condiciones termodinámicas de cada uno de los puntos en la Tabla 5.1.

TABLA 5. 1 Presión, temperatura y entalpía de los puntos de diseño

PUNTOS	P.abs. (Mpa)	Temp. (°C)	Entalpías (h)
1	0,140	37,68	227,365
2	1,064	39,82	230,647
3	1,057	40,68	234,47
4	1,022	119,59	698,36
5	0,181	83,41	648,13
6	0,175	81,4	643,60

Como se puede comprobar, el ciclo varía entre dos presiones principales, la de alta y la de baja. La zona de baja presión siempre es superior a la presión atmosférica ya que en el sistema no se utiliza desaireador por lo que para que el ciclo funcione correctamente no puede entrar aire en el sistema. Con presiones por encima de la atmosférica se asegura que esto no suceda.

Respecto a las temperaturas el mayor incremento se encuentra en el recuperador de calor, ya que se produce el mayor intercambio energético, el salto es de 78,91 °C frente a los 92,55°C del aceite térmico. El calor intercambiado es de 13 MW, con una efectividad del 46% y un NUT de 0,673.

En la turbina la presión cae 0,841 MPa y la temperatura 36,18°C desarrollando una potencia eléctrica de 3,1 MW teniendo en cuenta un rendimiento de la turbina del 70%.

En el regenerador se intercambian 0,13 MW con una efectividad de 5,07% y un NUT de 0,06. Mientras que en el condensador se disipan hacia el agua fría 28,78 MW. En la siguiente tabla se ilustra un resumen de los resultados obtenidos sobre los intercambiadores.

TABLA 5. 2 Resumen de resultados de Intercambiadores

	Potencia Intercambiada (MW)	Eficiencia (%)	NUT	UA	LMT D (°C)	Fluido Caliente (Kg/s)	Fluido Frío (Kg/s)
<b>Recuperador</b>	13	46	0,673	158088	43,03	166,15	62,74
<b>Regenerador</b>	0,13	5,07	0,06	9668,58	40,52	62,74	62,74
<b>Condensador</b>	28,78	59	0,89	756,54	27,54	62,74	176,9

La potencia intercambiada mayor es la del recuperador, seguida de la del condensador. En cuanto a tamaños se deduce a partir del UA que el intercambiador más grande va a ser el regenerador debido a sus condiciones de trabajo impuestas. Otro dato de análisis es el flujo de agua requerido en el condensador es de 176,9 kg/s. Este valor es muy superior a los demás flujos debido al alto grado de diferencia de temperaturas de 43,72°C frente a los 92,55°C del aceite térmico.

Continuando con los flujos, se observa que el caudal másico del aceite térmico es de 166,15 kg/s, caudal que aprovechamos para calentar el caudal de 62,74kg/s de isopentano. En ambos lados del regenerador circula el isopentano con el caudal de 30,53 kg/s.

En el condensador el isopentano intercambia su calor con un caudal de agua de 176,9 kg/s. Este valor es elevado por que el calor específico del agua es

29 veces inferior al calor específico del isopentano que circula por los conductos del condensador.

Como resumen, el punto nominal se ha diseñado para el 90% de apertura de los dampers de gases, explicado en la tabla 3.1, ya que actualmente se encuentra abierto un 10 a 30%. Con la apertura completa de los dampers se logra calentar el aceite térmico (69,16 kg/s), obteniéndose una potencia eléctrica neta de 3,1MW con una eficiencia del ciclo de 10%.

## 5.2.2 RESULTADOS OBTENIDOS RESPECTO AL CONSUMO DE DIESEL Y CRUDO

TABLA 5. 3 Resultados de las reducciones de Diesel y Crudo

	Sin ORC	Reducción con ORC	TOTAL IMPLEMENTADO ORC
<b>Cantidad de Diesel [Barriles/año]</b>	446.030	47.290,9	398.739,1
<b>Cantidad de Crudo [Barriles/año]</b>	579.839	61.478,2	518.360,8

Al implementar el ORC existe una cantidad total de consumo de Diesel de 398.739,1 barriles al año, en la Figura 5.3 se hace una comparación de la reducción al trabajar con y sin el ORC; para todos los meses del año y asumiendo que todo es constante debido a que la Planta NPF trabaja en la misma intensidad los 365 días del año.

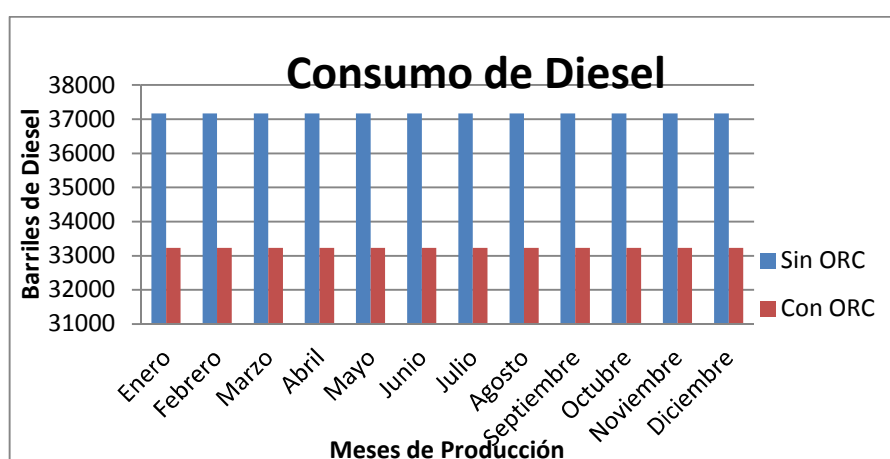


FIGURA 5. 3 Comparación de Consumo de Diesel antes y después de la implementación del Ciclo Rankine Orgánico.

Fuente: Propia.



El hecho de reducir el diesel implica de manera directa la disminución de crudo como se lo había indicado. De igual manera en el Figura 5.4 durante el proceso de producción de los 365 días del año, se observa claramente un gran porcentaje de producción.

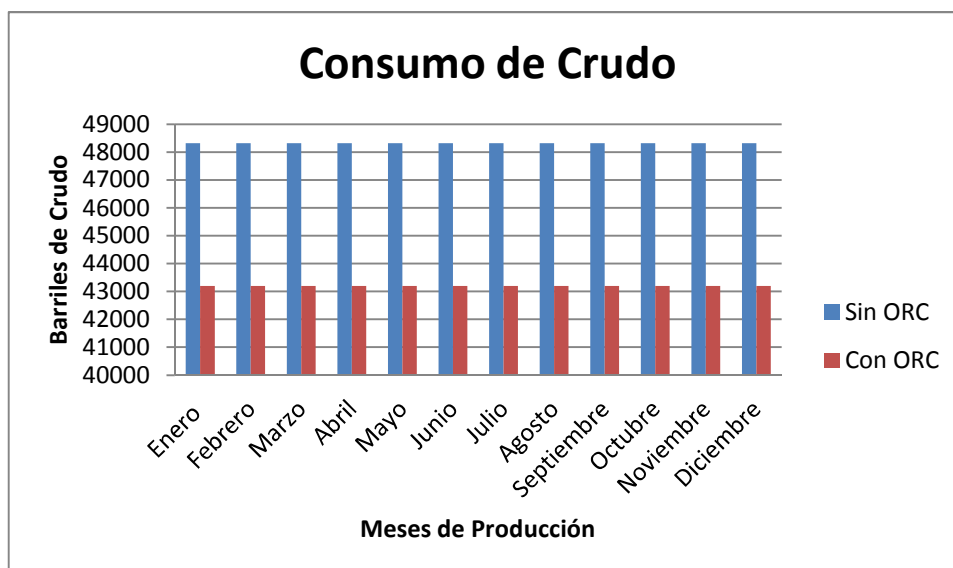


FIGURA 5. 4 Comparación de Consumo de Crudo antes y después de la implementación del Ciclo Rankine Orgánico.

**Fuente:** Propia.

Los gráficos anteriores expuestos representan a lo que sucedería en un año de producción, desde el inicio del 2014 hasta su fecha de culminación que será el 2018. Y esos resultados serán constantes del funcionamiento del ciclo Rankine Orgánico, para todos los años antes mencionados.

### 5.2.3 DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Dentro del Bloque 16 y en especial en la planta NPF existen varias formas para generar energía eléctrica como se había mencionado, entre ellas están por medio de turbinas a diesel, gas y generadores Wartsila.

Debido a que el presente proyecto está enfocado en una generación eléctrica de manera limpia, para poder reemplazar en un porcentaje en la generación de energía eléctrica por medio de diesel, se hace un balance de cómo podría ayudar y beneficiar sobre la demanda de energía eléctrica en NPF.

En el siguiente gráfico se puede observar de color verde oscuro la generación eléctrica mediante la utilización de Turbinas a base de Diesel durante el año 2004 y 2012.

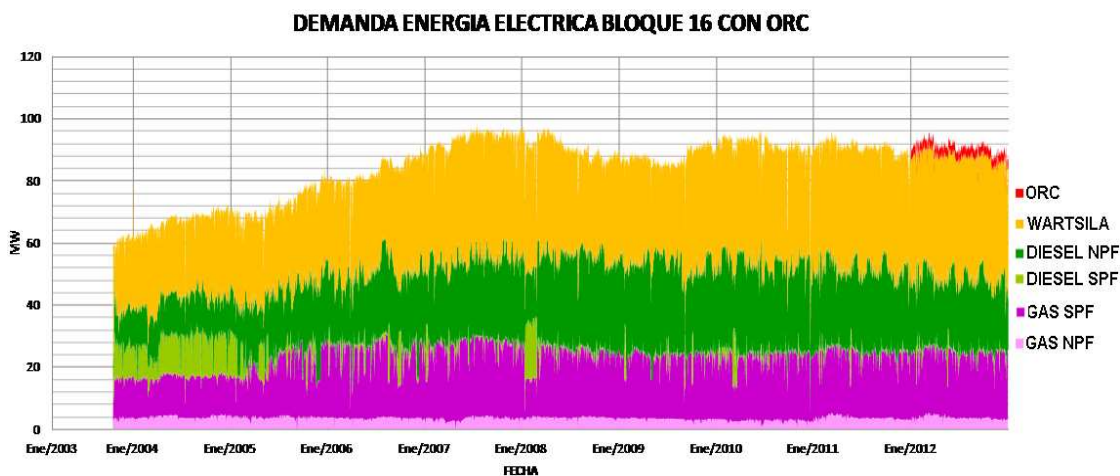


FIGURA 5. 5 Demanda de Energía eléctrica en el Bloque 16, simulando implementación del ORC.

**Fuente:** Propia

Se ha realizado un supuesto de que se implemente el ORC en el inicio del 2012 simulando con los datos hallados de potencia eléctrica en la turbina con ORC, con lo se puede observar una verdadera disminución del color verde que representa el consumo de diesel, para generar energía eléctrica.

Mientras tanto el color rojo que representa el ORC pasa a formar parte de la demanda de la energía eléctrica en todo el Bloque 16, siendo constante y así permanecerá durante los demás años que se lo tenga en funcionamiento.

#### 5.2.4 RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

Generar energía eléctrica a partir de calor residual que provoca los mismos gases de escape hacia el aceite térmico, realiza una cierta compensación en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Esta reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> está directamente influenciada con la cantidad de energía eléctrica se puede producir mediante la implementación del Ciclo Rankine Orgánico, como se observó se puede generar 3,1Mw con el ORC, lo que implica que hará reducir el consumo de Diesel en las Turbinas

LM 2500 y a su vez eliminando 19.723,9 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. En la siguiente gráfica se pone a consideración la cantidad de CO<sub>2</sub> producida actualmente, y la cantidad de CO<sub>2</sub> que se tendrá con el ORC.

## 5.3 RESULTADOS ECONÓMICOS

### 5.3.1 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

De acuerdo a los resultados obtenidos dentro del análisis financiero en el cual se tomó en consideración, ingresos, egresos, valor de salvamento, depreciación, impuestos, etc. Se obtuvo los resultados que se lo desglosan en la siguiente 5.4:

TABLA 5. 4 Resultados de Inversión, VAN y TIR

<b>Inversión</b>	\$ (6.241.683,40) USD
<b>VAN</b>	\$ (-1.640.716,79) USD
<b>TIR</b>	4%
<b>Tiempo</b>	6 años

Como se podrá observar el proyecto no es viable desde el punto de vista económico para REPSOL, determinado debido a los siguientes aspectos:

- Para hacer frente en tan corto tiempo, como lo es en 6 años, una inversión tan grande que conjuntamente con los costos operativos, depreciación e impuestos; generan un VAN negativo.
- El TIR resultó de un 4%, comparado para el TMAR que es del 19,19%; resultando que el  $TIR < TMAR$ .
- Al no poseer un valor de salvamento de los equipos a adquirirse, genera muchas pérdidas.
- El pago de impuestos del 15% (3% trabajadores y 12% comunidades), dada por la tasa impositiva genera mucho egreso de capital en cada año.

Pero en este análisis cabe recalcar un punto a favor, el cual es el ingreso que se obtiene por el ahorro de los 3,1 MW, dados por el Ciclo Rankine Orgánico, puesto que permite vender el crudo que se ahorra aproximadamente a

\$1'100.000 USD, aumentando cada año un porcentaje del 1,25% cada año. Por lo tanto, si REPSOL funciona más años, se obtendría un beneficio económico.

Finalmente cabe indicar que se respetó el coste normalizado de producción eléctrica los cuales fueron la suma del combustible, el de operación, el mantenimiento y el de la inversión.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

- Una vez finalizado el estudio del Ciclo Rankine Orgánico, se logró alcanzar el objetivo planteado sobre la Turbina (G-1170) con un requerimiento energético de 4096 hp el cual equivale a 3,1 MW para poder generar energía eléctrica y reemplazar ésta cantidad en las Turbinas LM 2500 generadas a Diesel.
- Se logró identificar energía calórica de los gases de escape que salen de las Turbinas LM 2500, estos a su vez calientan un aceite térmico con el cual se logró teóricamente evaporar el líquido isopentano. Esta energía calórica no es actualmente aprovechada al 100%; por lo que se puede aprovechar de mejor manera.
- La propiedad del fluido de trabajo en el caso presente, del isopentano, juega un papel vital en el rendimiento del Ciclo Rankine Orgánico. Ello involucra las propiedades termodinámicas y físicas, la estabilidad, los impactos ambientales, de seguridad, compatibilidad, y el coste del mismo.
- Al implementar Ciclo Rankine Orgánico con el cual se puede recuperar calor para poder generar energía eléctrica de un manera limpia, es decir sin quema de combustibles fósiles, ayuda a la reducción de gases de combustión al medio ambiente.
- Respecto al análisis económico no resulta rentable para la REPSOL, debido a que no se recupera la inversión en el tiempo estimado, pero cabe resaltar que la entrada que se tendría en la venta de crudo que se tendrá al ahorrar diesel para generación.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Para el enfriamiento del en el Circuito de Condensación se necesita de grandes cantidades de agua, por lo que sería factible analizar la posibilidad de aprovechamiento de aguas de formación.
- Sería necesario realizar pruebas periódicas de oxidación sobre la tubería del sistema de aceite térmico, debido a que se incrementa el flujo másico de los gases de escape.
- Particularmente, se debe prestar especial atención a las condiciones en las que llega el fluido a la bomba: una excesiva pérdida de carga puede hacer que entre en la campana bifásica, lo que favorecería la cavitación.
- Es recomendable incrementar el número de vida útil del proyecto, puesto que con ello se obtendría beneficios económicos muy rentables para la empresa REPSOL.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Data ROOM; **REPSOL**; Quito; 1998.
2. **F., INCROPERA**; Principios de Transferencia de Calor; Mc. GrawHill; 1999; 4ta Ed.
3. **CENGEL Y., BOLES M.**; TERMODINÁMICA; Mc Graw Hill; 2009.
4. **SCHUSTER, A., KARELLAS, S., KAKARAS, E., SPLIETHOFF, H.** Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. Applied Thermal Engineering; 2009; Vol. 29.
5. **PAWEL GRABÍNSKI**; Optimization of the Performance of an Organic Rankine Cycle used as Waste Heat REcovery System \_In a Bio-Liquid Diesel Engine Power Plant; Iceland; 2011.
6. <http://ebookbrowse.com/taz-pfc-2010-022-pdf-d222171992>.
7. **LELAND BLANK, ANTHONY TARQUIN**; Ingeniería Económica; Mac Graw-Hill, 2004.
8. **ENEKO ECHEVARRIA, M**; "Economía de la utilización de Ciclos Binarios para Recuperación de Calor de baja Temperatura .
9. **REYNOLDS, WILLIAM C.**; Thermodynamic Properties In SI, Tables and Computational Equations for forty substances. Stanford University.
10. **J.I., LINARES, B.Y., MORATILLA M., DIAGO LOPEZ**; "Recuperación de Calor de Refrigeración de un motor a gas mediante ciclo OCR"; Badajoz; June 2007.
11. **LUTERO, CANVI**; GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO; Cataluña; Version 11; 2011.
12. [http://cdm.unfccc.int/EB/027/eb27\\_repan08.pdf](http://cdm.unfccc.int/EB/027/eb27_repan08.pdf).
13. CDM pipeline overview of CD4CDM (UNEP). 1 de Noviembre 2011.

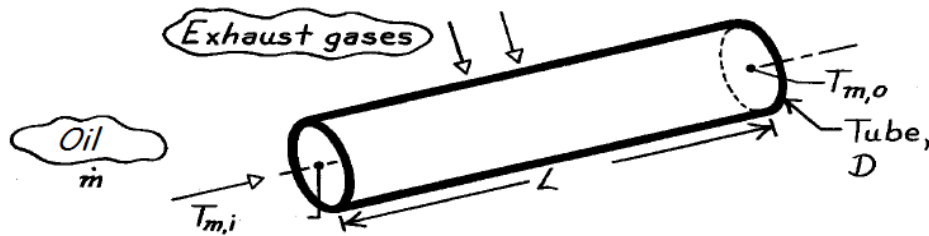
## **ANEXOS**



## ANEXO A

### A.1 CÁLCULO PARA FLUJO MÁSIICO

Para el cálculo del flujo másico, tanto del aceite térmico como del isopentano, se utiliza las siguientes fórmulas, que son un sistema de ecuaciones.



$$q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{m,o} - T_{m,i})$$

$$\frac{T_s - T_{m,o}}{T_s - T_{m,i}} = \exp\left(-\frac{PL\bar{h}}{\dot{m}C_p}\right)$$

$$N_{UD} = \frac{\bar{h}D}{k}$$

$$N_{UD} = 1.86 \left(\frac{ReDPr}{L/D}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14}$$

$$T_m = \frac{T_{m,i} - T_{m,o}}{2}$$

$$ReD = \frac{4\dot{m}}{\pi D\mu}$$

## ANEXO B

## B.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ISOPENTANO

<b>Propiedades físicas del: Isopentano</b>	
Peso molecular o Masa molecular	72.2 kg/kgmol
Condiciones: Condiciones no establecidas	
<hr/>	
Densidad	600 kg/m <sup>3</sup>
Condiciones: Condiciones no establecidas	
<hr/>	
Densidad de vapor	3.2325 kg/m <sup>3</sup>
Condiciones: Condiciones no establecidas	
<hr/>	
Punto de flash o Punto de inflamación	222.15 K
Condiciones: Condiciones no establecidas	
<hr/>	
Punto de fusión	113.15 K
Condiciones: Condiciones no establecidas	
<hr/>	
Punto de ebullición	301.15 K
Condiciones: Condiciones no establecidas	
<hr/>	
Presión de vapor	79000 Pa
Condiciones:	20 °C

---

Presión de vapor 79000 Pa

Condiciones: 20 °C

---

Solubilidad 0

Condiciones: Ninguna

---

Coefficiente de reparto octanol/agua 2.3

Condiciones: Condiciones no establecidas

---

Temperatura de autoignición 693.15 K

Condiciones: Condiciones no establecidas

---

Límites de explosividad 1.4 - 7.6 % v/v en aire

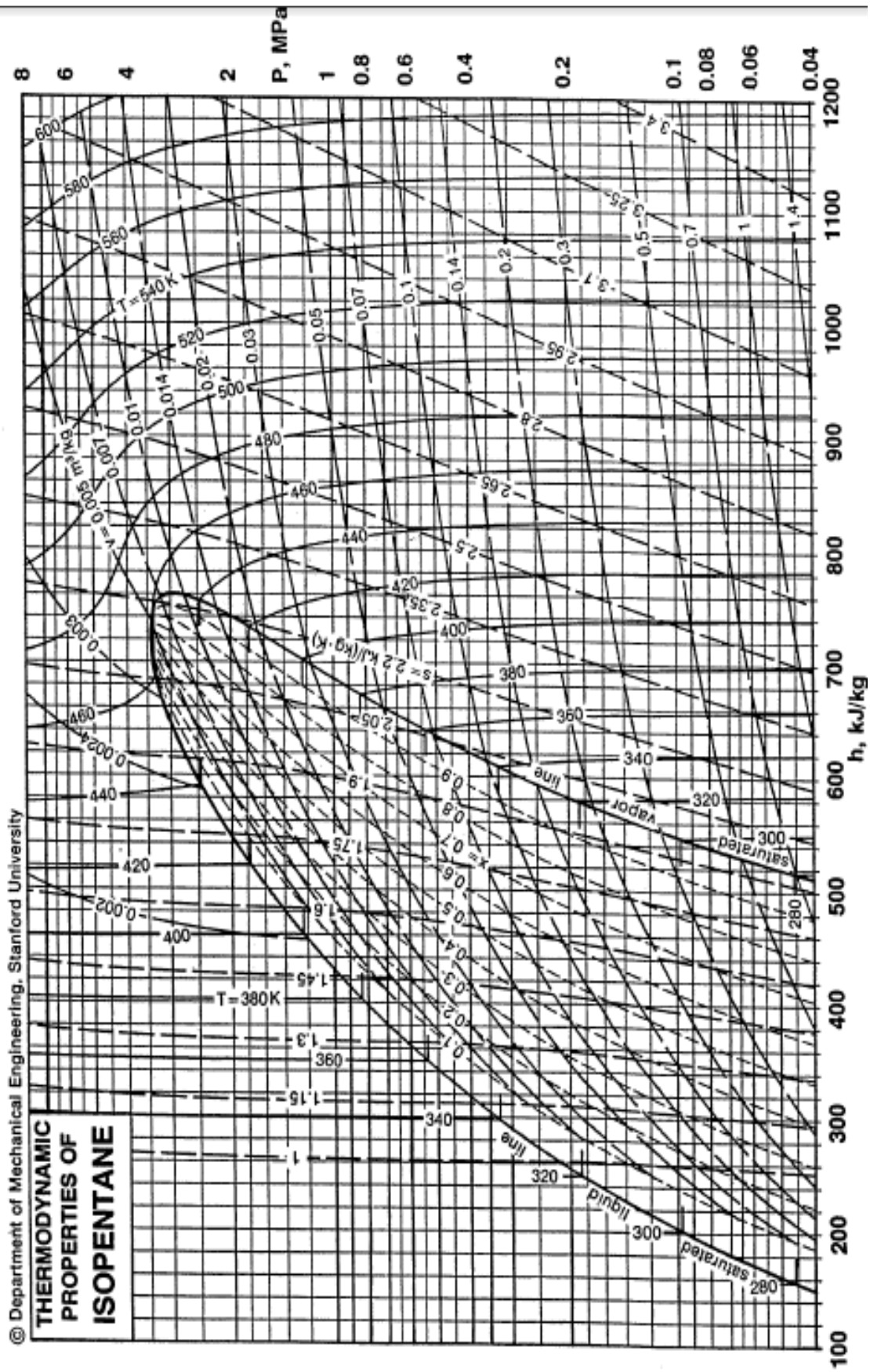
Condiciones: Condiciones no establecidas

---

Densidad de la mezcla vapor/aire 2.651 kg/m<sup>3</sup>

Condiciones: 20 °C





## ANEXO C

## C.1 PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS DEL ACEITE TERMICO EN EL SISTEMA



SGS Oil, Gas and Chemicals  
 SGS del Ecuador S.A.  
 Lago Agrio  
 Vía a Quito Km 2.5  
 Barrio Pablo Alverca  
 Ecuador

Consortio Petrolero Bloque 16 y Area Tivacuno  
 Av 12 de Octubre N24-593 y Francisco Salazar Edificio  
 Quito  
 Ecuador

## Informe de Ensayo LA11-00355.001

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO:	Lubrication Oil	REQUIRED BY:	Ing. Martin Vallejo
LOCALIDAD:	Lago Agrio	SGS ORDEN NO.:	OGC-230517
ORIGEN DE LA MUESTRA:	Tanque	CLIENTE ID:	Aceite de T-2070 (Usado)
TIPO DE MUESTRA:	Después de la descarga	ORIGEN ID:	OTROS
MUESTREO:	24/11/2011	MUESTREADO POR:	Client
ANALIZADO:	05/12/2011 - 07/12/2011	RECIBIDO:	05/12/2011
CANTIDAD:	Dos Litros	COMPLETADO:	07/12/2011

ENSAYO	MÉTODO	RESULTADO	UNIT
Densidad a 15°C	ASTM D1298	0.8714	g/cm <sup>3</sup>
Punto de Inflamación PMCC - Procedimiento A	ASTM D93	147.0	°C
Índice de Viscosidad	ASTM D2270	103	—
Punto de Fluidez	ASTM D97	-19	°C
Viscosidad Cinematica a 40°C	ASTM D445	33.80	cSt

Los resultados mostrados en este informe de análisis se refieren específicamente a la(s) muestra(s) analizadas como fueron recibidas a menos que se indique lo contrario. Todas las pruebas han sido realizadas utilizando la última revisión de los métodos indicados, a menos que se indique lo contrario en el informe. Los parámetros de precisión se aplican en la determinación de los resultados arrojados. Los usuarios de los datos mostrados en este informe debe referirse a las últimas revisiones publicadas de la norma ASTM D-3244, IP-367 y la norma ISO 4259 y cuando la utilización de los datos de prueba para determinar la conformidad con cualquier especificación o necesaria para la transformación. Este informe de ensayo ha sido publicada bajo condiciones de la Compañía General de Servicio (copia disponible a petición, o en la página web de la compañía en [www.sgs.com](http://www.sgs.com)). Se llama la atención a las limitaciones de responsabilidad, indemnización y cuestiones de competencia defrída en el mismo. El presente informe no podrá ser reproducido excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del laboratorio.

Firma Autorizada  Franklin Téran - Jefe de Laboratorio	Consortio Petrolero Bloque 16 y Area Tivacuno
--	---

FECHA: 2011/12/07

D-LAB-P-19-1

07122011 2013 0000000488

OGC/ECIEN\_REPORT12011-06

Página 1 de 2

SGS del Ecuador S.A.

SGS del Ecuador S.A. - Lago Agrio Vía a Quito Km 2.5 Barrio Pablo Alverca

Member of the SGS Group ( Société Générale de Surveillance )

# SGS

SGS Oil, Gas and Chemicals  
 SGS del Ecuador S.A.  
 Lago Agrio  
 Vía a Quito Km 2.5  
 Barrio Pablo Alverca  
 Ecuador

Consorcio Petrolero Bloque 16 y Area Tivacuno  
 Av 12 de Octubre N24-593 y Francisco Salazar Edificio  
 Quito  
 Ecuador

## Informe de Ensayo LA11-00355.002

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO :	Lubrication Oil	REQUIRED BY:	Ing. Martin Vallejo
LOCALIDAD :	Lago Agrio	SGS ORDEN NO.:	OGC-230517
ORIGEN DE LA MUESTRA :	Tanque	CLIENTE ID :	Aceite de T-2075 Stock)
TIPO DE MUESTRA :	Después de la descarga	ORIGEN ID :	OTROS
MUESTREO :	24/11/2011	MUESTREADO POR :	Client
ANALIZADO :	05/12/2011 - 07/12/2011	RECIBIDO :	05/12/2011
CANTIDAD:	Dos Litros	COMPLETADO :	07/12/2011

ENSAYO	MÉTODO	RESULTADO	UNIT
Densidad a 15°C	ASTM D1298	0.8687	g/cm <sup>3</sup>
Punto de Inflamación PMCC - Procedimiento A	ASTM D93	142.0	°C
Indice de Viscosidad	ASTM D2270	133	---
Punto de Fluidez	ASTM D97	-20	°C
Viscosidad Cinematica a 40°C	ASTM D445	35.20	cSt

\*\* Fin De Los Resultados Analíticos \*\*

Los resultados mostrados en este informe de analisis se refieren específicamente a la(s) muestra (s) analizadas como fueron recibidas a menos que se indique lo contrario. Todas las pruebas han sido realizadas utilizando la última revisión de los métodos indicados, a menos que se indique lo contrario en el informe. Los parámetros de precisión se aplican en la determinación de los resultados anteriores. Los usuarios de los datos mostrados en este informe debe referirse a las últimas revisiones publicadas de la norma ASTM D-3244, IP 367 y la norma ISO 4259 y cuando la utilización de los datos de prueba para determinar la conformidad con cualquier especificación o necesaria para la transformación. Este informe de ensayo ha sido publicada bajo condiciones de la Compañía General de Servicio (copia disponible a petición, o en la página web de la compañía en [www.sgs.com](http://www.sgs.com)). Se llama la atención a las limitaciones de responsabilidad, indemnización y cuestiones de competencia deñidas en el mismo. El presente informe no podrá ser reproducido excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del laboratorio.

<p>Firma Autorizada</p>   <p>Franklin Téran - Jefe de Laboratorio</p>	<p>Consorcio Petrolero Bloque 16 y Area Tivacuno</p>
---	--

FECHA: 2011/12/07

D-LAB-P-19-1

07122011 2013 0000000488

OGC/EC/EN\_REPORT/2011-06

Página 2 de 2

SGS del Ecuador S.A.

SGS del Ecuador S.A. - Lago Agrio Vía a Quito Km 2.5 Barrio Pablo Alverca

Member of the SGS Group ( Société Générale de Surveillance )

## C.2 DATOS DE SEGURIDAD DEL ACEITE TÉRMICO

1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO			
<b>Empresa:</b> REPSOL YPF <b>DIRECCIÓN LUBRICANTES</b> <b>LATINOAMÉRICA</b>  <b>Dirección:</b> Tucumán 744 Piso 7° (cp 1049) – Buenos Aires <b>ARGENTINA</b>  <b>Tel. (+ 5411) 4326-8464</b> <b>Fax (+ 5411) 4329-2000</b> <b>Tel. Emergencia: (+ 54221) 429-8615</b>	<b>Nombre comercial:</b> CAUQUEN 1 <b>Nombre químico:</b> Aceite lubricante		
	<b>Sinónimos:</b> Aceite de temple de baja velocidad de enfriamiento, para aceros rápidos.		
	<b>Fórmula:</b> Mezcla compleja de hidrocarburos y aditivos.	<b>N° CAS:</b> NP	
	<b>N° CE (EINECS):</b> NP	<b>N° Anexo I (67/548/CEE):</b> NP	

2. COMPOSICIÓN			
<b>Composición general:</b> Mezcla de aceite mineral parafínico y aditivo antioxidante para alta temperatura. Formulación compleja de hidrocarburos saturados con un número de carbonos dentro del intervalo de C <sub>15</sub> -C <sub>50</sub> . La base lubricante contiene menos del 2% de PCA's (extracto DMSO medido según IP 346).			
<b>Componentes peligrosos:</b>	<b>Rango %</b>	<b>Clasificación</b>	
		<b>R</b>	<b>S</b>
NP			

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS	
FÍSICO / QUÍMICOS	TOXICOLÓGICOS (SÍNTOMAS)
Líquido combustible.	<b>Inhalación:</b> Los vapores y nieblas de aceite en exposiciones cortas provocan irritación del sistema respiratorio. Exposiciones prolongadas pueden ocasionar fibrosis pulmonar. <b>Ingestión:</b> La absorción intestinal es muy limitada. La ingestión accidental de grandes cantidades provoca irritación del aparato digestivo, náuseas, vómitos y diarrea. <b>Contacto piel:</b> La toxicidad percutánea es muy baja en contactos cortos. Contactos prolongados provocan escozor, irritación e incluso dermatitis por eliminación de las grasas naturales. <b>Contacto ojos:</b> La exposición repetida a vapores o al líquido puede causar irritación.
Flota en el agua. Puede obstruir desagües y tomas de agua.	<b>Efectos tóxicos generales:</b> Irritación por contacto de líquidos y por inhalación prolongada de vapores o nieblas.



<b>4. PRIMEROS AUXILIOS</b>
<b>Inhalación:</b> Trasladar al afectado a una zona de aire fresco. Si la respiración es dificultosa practicar respiración artificial o aplicar oxígeno. Solicitar asistencia médica.
<b>Ingestión/aspiración:</b> NO INDUCIR EL VÓMITO. Si el afectado está consciente, suministrarle agua o leche. Solicitar asistencia médica.
<b>Contacto piel:</b> Lavar las partes afectadas con agua y jabón.
<b>Contacto ojos:</b> Lavar abundantemente con agua durante unos 15 minutos. Solicitar asistencia médica.
<b>Medidas generales:</b> Solicitar asistencia médica.

<b>5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS</b>
<b>Medios de extinción:</b> Espumas, polvo químico, CO <sub>2</sub> . NO UTILIZAR NUNCA CHORRO DE AGUA DIRECTO.
<b>Contraindicaciones:</b> NP
<b>Productos de combustión:</b> CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CO (en caso de combustión incompleta).
<b>Medidas especiales a tomar:</b> Mantener alejados de la zona de fuego los recipientes con producto. Enfriar los recipientes expuestos a las llamas. Consultar y aplicar planes de emergencia en el caso de que existan.
<b>Peligros especiales:</b> NP
<b>Equipos de protección:</b> Prendas para lucha contra incendios resistentes al calor. Cuando exista alta concentración de vapores o humos utilizar aparato de respiración autónoma.

<b>6. MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL</b>	
<b>Precauciones para el medio ambiente:</b> Peligro de contaminación física importante en caso de vertido (litorales costeros, suelos, etc.) debido a su flotabilidad y consistencia oleosa. Evitar la entrada de producto en alcantarillas y tomas de agua.	<b>Precauciones personales:</b> Evitar el contacto prolongado con el producto o con las ropas contaminadas y la inhalación de vapores o nieblas.
<b>Detoxificación y limpieza:</b> <b>Derrames pequeños:</b> Secar la superficie con materiales ignífugos y absorbentes. Depositar los residuos en contenedores cerrados para su posterior eliminación. <b>Derrames grandes:</b> Evitar la extensión del líquido con barreras y retirar posteriormente el producto.	<b>Protección personal:</b> Durante la operación de limpieza deben usarse ropa de protección adecuada, guantes y gafas.

## 7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

### Manipulación:

*Precauciones generales:* Evitar el contacto prolongado y la inhalación prolongada de vapores o nieblas del producto. Durante el trasvase evitar el contacto con el aire; usar bombas y conexiones con toma de tierra para evitar generar cargas electrostáticas. En caso de contaminación del aire en el lugar de producción o trabajo, este debe ser filtrado antes de eliminarlo.

*Condiciones específicas:* En el trasvase, se recomienda el empleo de guantes, visores o gafas para evitar salpicaduras. No soldar o cortar en zonas próximas a recipientes llenos del producto. Con recipientes vacíos seguir precauciones similares. Antes de hacer cualquier reparación en un tanque, asegurarse de que está correctamente purgado y lavado.

### Almacenamiento:

*Temperatura y productos de descomposición:* La combustión incompleta del producto puede producir CO y otras sustancias asfixiantes.

*Reacciones peligrosas:* NP

*Condiciones de almacenamiento:* Guardar el producto en recipientes cerrados y etiquetados. Mantener los recipientes en lugar fresco y ventilado, alejados del calor y de fuentes de ignición. No fumar, soldar o realizar cualquier tipo de actividad que provoque la formación de llamas o chispas en el área de almacenamiento. Mantener alejado de oxidantes fuertes.

*Materiales incompatibles:* Oxidantes fuertes.

## 8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL

### Equipos de protección personal:

*Protección respiratoria:* El producto es poco volátil a temperatura ambiente y no presenta riesgos especiales. En presencia de aceites calientes usar protección respiratoria.

*Protección ocular:* Protección ocular ante el riesgo de salpicaduras.

*Protección cutánea:* Guantes impermeables al producto (no usar gomas naturales ni de butilo).

*Otras protecciones:* Duchas y lavaojos en el área de trabajo.

**Precauciones generales:** Evitar el contacto prolongado y la inhalación de vapores y nieblas del producto. Sistema de extracción de vapores cercano al lugar de generación.

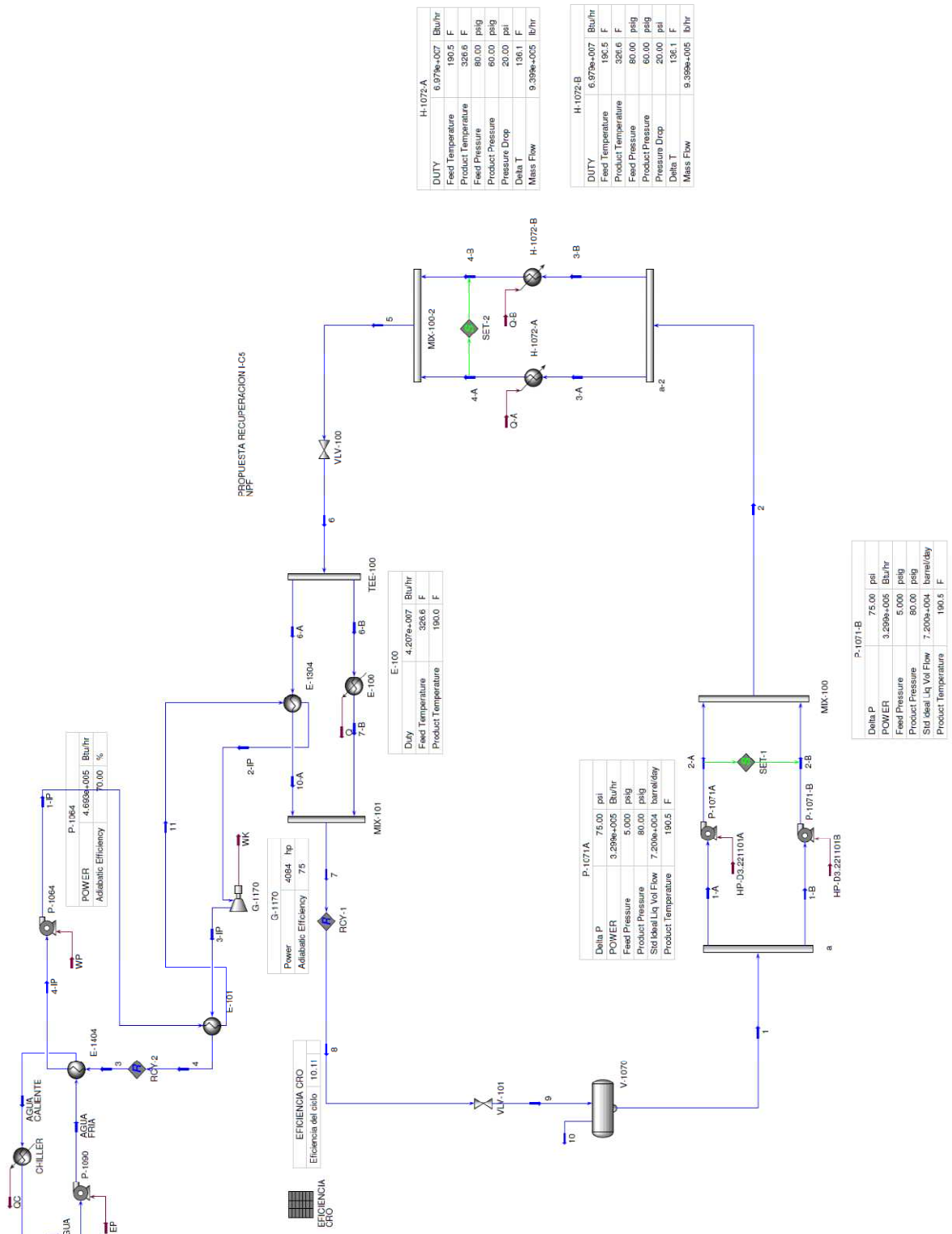
**Prácticas higiénicas en el trabajo:** Las botas o zapatos contaminados deben desecharse. La ropa impregnada de producto no debe lavarse junto con otras prendas. Seguir las medidas de cuidado e higiene de la piel, lavando con agua y jabón y aplicando cremas protectoras.

### Controles de exposición:

TLV/TWA (ACGIH): 5 mg/m<sup>3</sup> (nieblas de aceite mineral)

# ANEXO D

## D.1 SIMULACIÓN EN HYSYS



## D.2 DATOS DE LA SIMULACIÓN EN HYSYS

	<i>Unit</i>	1-A	1-B	2-B	2-A
Vapour Fraction		0	0	0	0
Temperature	<i>C</i>	87,973827	87,973827	88,062454	88,062454
Pressure	<i>kPa</i>	135,799175	135,799175	652,906106	652,906106
Molar Flow	<i>kgmole/h</i>	1098,81251	1098,81251	1098,81251	1098,81251
Mass Flow	<i>kg/h</i>	426356,015	426356,015	426356,015	426356,015
Liquid Volume Flow	<i>m3/h</i>	476,962702	476,962702	476,962702	476,962702
Heat Flow	<i>kJ/h</i>	-856337518	-856337518	-855989405	-855989405
Vapour Phase	<i>STD_m3/h</i>	0	0	<empty>	<empty>
Thermal Conductivity	<i>W/m-K</i>	0,122403	0,122403	0,122391	0,122391
Mass Density	<i>kg/m3</i>	844,44585	844,44585	844,695897	844,695897
Viscosity	<i>cP</i>	6,199758	6,199758	6,189072	6,189072
Kinematic Viscosity	<i>cSt</i>	7,341806	7,341806	7,326982	7,326982

	<i>Unit</i>	2	3-A	3-B	4-A
Vapour Fraction		0	0	0	0
Temperature	<i>C</i>	88,062454	88,062454	88,062454	163,658174
Pressure	<i>kPa</i>	652,906106	652,906106	652,906106	515,010925
Molar Flow	<i>kgmole/h</i>	2197,62501	1098,81251	1098,81251	1098,81251
Mass Flow	<i>kg/h</i>	852712,03	426356,015	426356,015	426356,015
Liquid Volume Flow	<i>m3/h</i>	953,925403	476,962702	476,962702	476,962702
Heat Flow	<i>kJ/h</i>	-	-855989405	-855989405	-782353940
Vapour Phase	<i>STD_m3/h</i>	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>
Thermal Conductivity	<i>W/m-K</i>	0,122391	0,122391	0,122391	0,112397
Mass Density	<i>kg/m3</i>	844,695897	844,695897	844,695897	791,646452
Viscosity	<i>cP</i>	6,189072	6,189072	6,189072	0,95352
Kinematic Viscosity	<i>cSt</i>	7,326982	7,326982	7,326982	1,204477

	<i>Unit</i>	<b>4-B</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Vapour Fraction</b>		0	0	0	0
<b>Temperature</b>	<i>C</i>	163,658174	163,658174	163,658174	87,777778
<b>Pressure</b>	<i>kPa</i>	515,010925	515,010925	515,010925	480,537129
<b>Molar Flow</b>	<i>kgmole/h</i>	1098,81251	2197,62501	2197,62501	2197,62501
<b>Mass Flow</b>	<i>kg/h</i>	426356,015	852712,03	852712,03	852712,03
<b>Liquid Volume Flow</b>	<i>m3/h</i>	476,962702	953,925403	953,925403	953,925403
<b>Heat Flow</b>	<i>kJ/h</i>	-782353940	1564707881	1564707881	1712675035
<b>Vapour Phase</b>		<empty>	<empty>	<empty>	<empty>
<b>Thermal Conductivity</b>	<i>W/m-K</i>	0,112397	0,112397	0,112397	0,122428
<b>Mass Density</b>	<i>kg/m3</i>	791,646452	791,646486	791,646486	844,78221
<b>Viscosity</b>	<i>cP</i>	0,95352	0,95352	0,95352	6,228333
<b>Kinematic Viscosity</b>	<i>cSt</i>	1,204477	1,204477	1,204477	7,372709

	<i>Unit</i>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>8</b>
<b>Vapour Fraction</b>		0	1	0	0
<b>Temperature</b>	<i>C</i>	87,973827	87,973827	87,973827	87,777778
<b>Pressure</b>	<i>kPa</i>	135,799175	135,799175	135,799175	480,537129
<b>Molar Flow</b>	<i>kgmole/h</i>	2197,62501	0	2197,62501	2197,62501
<b>Mass Flow</b>	<i>kg/h</i>	852712,03	0	852712,03	852712,03
<b>Liquid Volume Flow</b>	<i>m3/h</i>	953,925403	0	953,925403	953,925403
<b>Heat Flow</b>	<i>kJ/h</i>	1712675035	0	1712675035	-1712675035
<b>Vapour Phase</b>		<empty>	0	0	<empty>
<b>Thermal Conductivity</b>	<i>W/m-K</i>	0,122403	0,014706	0,122403	0,122428
<b>Mass Density</b>	<i>kg/m3</i>	844,44585	5,685795	844,44585	844,853174
<b>Viscosity</b>	<i>cP</i>	6,199758	0,006001	6,199758	6,228676
<b>Kinematic Viscosity</b>	<i>cSt</i>	7,341806	1,055374	7,341806	7,372495

	<i>Unit</i>	<b>6-B</b>	<b>6-A</b>	<b>10-A</b>	<b>7-B</b>
<b>Vapour Fraction</b>		0	0	0	0
<b>Temperature</b>	<i>C</i>	163,658174	163,658174	87,777778	87,777778
<b>Pressure</b>	<i>kPa</i>	515,010925	515,010925	480,537129	480,537129
<b>Molar Flow</b>	<i>kgmole/h</i>	659,287503	1538,33751	1538,33751	659,287503
<b>Mass Flow</b>	<i>kg/h</i>	255813,609	596898,421	596898,421	255813,609
<b>Liquid Volume Flow</b>	<i>m3/h</i>	286,177621	667,747782	667,747782	286,177621
<b>Heat Flow</b>	<i>kJ/h</i>	-469412364	1095295516	1198872525	-513802511
<b>Vapour Phase</b>		<empty>	<empty>	<empty>	<empty>
<b>Thermal Conductivity</b>	<i>W/m-K</i>	0,112397	0,112397	0,122428	0,122428
<b>Mass Density</b>	<i>kg/m3</i>	791,646486	791,646486	844,78221	844,78221
<b>Viscosity</b>	<i>cP</i>	0,95352	0,95352	6,228333	6,228333
<b>Kinematic Viscosity</b>	<i>cSt</i>	1,204477	1,204477	7,372709	7,372709

	<i>Unit</i>	<b>1-IP</b>	<b>2-IP</b>	<b>3-IP</b>	<b>4-IP</b>
<b>Vapour Fraction</b>		0	1	1	0
<b>Temperature</b>	<i>C</i>	38,921577	119,444444	83,264847	38,234094
<b>Pressure</b>	<i>kPa</i>	1066,59165	1025,2231	184,062489	142,693934
<b>Molar Flow</b>	<i>kgmole/h</i>	3130,47051	3130,47051	3130,47051	3130,47051
<b>Mass Flow</b>	<i>kg/h</i>	225866,581	225866,581	225866,581	225866,581
<b>Liquid Volume Flow</b>	<i>m3/h</i>	362,289635	362,289635	362,289635	362,289635
<b>Heat Flow</b>	<i>kJ/h</i>	-554989254	-450576482	-461540505	-555484370
<b>Vapour Phase</b>		<empty>	74018,2109	74018,2109	0
<b>Thermal Conductivity</b>	<i>W/m-K</i>	0,096772	0,024443	0,019686	0,096978
<b>Mass Density</b>	<i>kg/m3</i>	602,911568	29,048075	4,695013	602,103536
<b>Viscosity</b>	<i>cP</i>	0,187293	0,009618	0,008088	0,188193
<b>Kinematic Viscosity</b>	<i>cSt</i>	0,310647	0,331097	1,722681	0,312559

	<i>Unit</i>	<b>AGUA CALIENTE</b>	<b>AGUA FRIA</b>	<b>AGUA</b>	<b>3</b>
<b>Vapour Fraction</b>		0	0	0	1
<b>Temperature</b>	<b>C</b>	48,888889	15	14,994258	81,25995
<b>Pressure</b>	<b>kPa</b>	273,694357	308,168152	239,220561	177,16773
<b>Molar Flow</b>	<b>kgmole/h</b>	35352,1067	35352,1067	35352,1067	3130,47051
<b>Mass Flow</b>	<b>kg/h</b>	636871,754	636871,754	636871,754	225866,581
<b>Liquid Volume Flow</b>	<b>m3/h</b>	638,156988	638,156988	638,156988	362,289635
<b>Heat Flow</b>	<b>kJ/h</b>	-1,0024E+10	-1,0117E+10	-1,0117E+10	-462376269
<b>Vapour Phase</b>		<empty>	<empty>	<empty>	74018,2109
<b>Thermal Conductivity</b>	<b>W/m-K</b>	0,642009	0,595342	0,595332	0,019479
<b>Mass Density</b>	<b>kg/m3</b>	989,163686	1014,8673	1014,85151	4,539751
<b>Viscosity</b>	<b>cP</b>	0,554606	1,135969	1,136138	0,008036
<b>Kinematic Viscosity</b>	<b>cSt</b>	0,560682	1,119327	1,119512	1,770093

	<i>Unit</i>	<b>4</b>	<b>11</b>
<b>Vapour Fraction</b>		1	0
<b>Temperature</b>	<b>C</b>	81,25995	40,529032
<b>Pressure</b>	<b>kPa</b>	177,16773	1059,69689
<b>Molar Flow</b>	<b>kgmole/h</b>	3130,47051	3130,47051
<b>Mass Flow</b>	<b>kg/h</b>	225866,581	225866,581
<b>Liquid Volume Flow</b>	<b>m3/h</b>	362,289635	362,289635
<b>Heat Flow</b>	<b>kJ/h</b>	-462376269	-554153490
<b>Vapour Phase</b>		74018,2109	<empty>
<b>Thermal Conductivity</b>	<b>W/m-K</b>	0,019479	0,09629
<b>Mass Density</b>	<b>kg/m3</b>	4,539751	601,155857
<b>Viscosity</b>	<b>cP</b>	0,008036	0,184471
<b>Kinematic Viscosity</b>	<b>cSt</b>	1,770093	0,30686

## PLANOS







