



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CICLOS BINARIOS DE ALTA TEMPERATURA PARA
GEOTERMIA**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

SISTEMAS ENERGÉTICOS – ECONOMÍA DE LA ENERGÍA

PRESENTA:

ISAÍAS HERNÁNDEZ CARRILLO

TUTOR:

Dr. GERARDO HIRIART LE BERT

2010





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Ciclos Binarios de Alta Temperatura para Geotermia

Contenido

1. Geotermia Convencional y no Convencional.....	6
1.1. Sistemas Geotermicos Mejorados (EGS).....	6
1.2. Geotermia Supercrítica.....	7
2. Selección del Fluido de Trabajo para Ciclo Binario	12
2.1. Fluidos Candidatos.....	12
2.2. Método de comparación.....	13
2.3. Criterios de Selección.....	14
2.3.1. Eficiencia.....	14
2.3.2. Humedad en la turbina	16
2.3.3. Tamaño de turbina.....	18
2.3.4. Aspectos ambientales y de salud.....	20
2.4. Selección del fluido.....	22
3. Ciclo Binario de Alta Temperatura	24
3.1. Termodinámica del Ciclo.....	24
3.1.1. Optimización	29
4. Posible Aplicación a un Caso Supercrítico.....	31
4.1. Escenario base.....	32
4.2. Aplicación.....	33
4.3. Sensibilidad.....	36
4.3.1. Temperatura del recurso.....	36
4.3.2. Fluido de trabajo.....	36
4.4. Discusión.....	38
5. Futuro tecnológico.....	39
Conclusiones.....	42
Referencias.....	43
Anexos.....	45

Figuras.

Figura 1 Perfil de temperaturas, indicio de yacimiento supercrítico.....	8
Figura 2 Diagrama T-s del agua mostrando las fases presentes.....	10
Figura 3 Diagrama general T-s de un ciclo Rankine (T_H , P_H condiciones de evaporación y T_C , P_C condiciones de condensación).....	15
Figura 4 Diagrama T-s de fluidos típicos clasificados por humedad.....	18
Figura 5 Ciclo Termodinámico y nomenclatura para cada estado.....	25
Figura 6 Rendimiento del ciclo binario.....	30
Figura 7 Fotografía de las pruebas de flujo del IDDP-1, Marzo 2010.....	32
Figura 8 Balance térmico resumido del ciclo binario (escenario base).....	33
Figura 9 Diagrama T-s del sistema de generación.....	34
Figura 10 Diagrama de flujo de calor en los intercambiadores.....	35

Tablas.

Tabla 1 Clasificación de Sustancias Incluidas en el Análisis.....	12
Tabla 2 Ranking de los fluidos mejor evaluados.....	22
Tabla 3 Datos de alimentación para el escenario base.....	32
Tabla 4 Selección Básica de los Intercambiadores de Calor.....	34
Tabla 5 Sensibilidad de Resultados Variando la Temperatura.....	36
Tabla 6. Proyectos EGS en desarrollo.....	39

Introducción

En la actualidad existen muchos campos geotérmicos que se encuentran a temperaturas iguales o superiores a la crítica. Sin ir más lejos en el campo geotérmico mexicano de Los Hornos se han medido temperaturas superiores a los 400°C. También en Islandia, donde se lleva a cabo un proyecto internacional de perforación profunda, se llegó por accidente, en las cercanías del campo de Krafla, pinchar a no muy alta profundidad, un cuello volcánico de lava con temperaturas superiores a los 500°C¹. Por otro lado en un estudio reciente² para aprovechar la energía geotérmica submarina, en las costas de Islandia, se explican las condiciones que se pueden esperar en las cordilleras submarinas de distensión, especialmente si además de aprovechar los chorros de agua caliente se perfora junto a ellos.

Aquí aparece como evidente la necesidad de estudiar las características de una planta que **no emplee directamente el fluido geotérmico** flasheado para mover las turbinas, sino que transfiera la energía del fluido geotérmico, que tiene muy alta temperatura, a otro secundario que sea limpio y eficiente para generar energía en una turbina de vapor. Es decir, como primera necesidad de estudiar ciclos binarios de alta temperatura es la existencia de yacimientos de muy alta temperatura difíciles de manejar en superficie.

Por otro lado, un fluido geotérmico es por lo general portador de una gran cantidad de minerales disueltos, gases y compuestos ácidos que hacen impráctico su uso en forma directa en las turbinas. Por ello. Aunque parezca antieconómico, es necesario estudiar el traspaso de calor de este fluido geotérmico a uno secundario, limpio y eficiente.

Cada vez cobra más fuerza transformar las plantas geotérmicas actuales, que operan mediante flasheo, a plantas de ciclo binario, sobre todo si se pudiera usar agua en el secundario a temperaturas relativamente altas. Una planta tradicional que opera con flasheo, es diseñada para manejar vapor acompañado de gases no condensables, es decir se le debe instalar una bomba de vacío en el condensador para extraerle los gases incondensables (lo que puede significar un alto consumo de potencia). Además la presencia de gases como el CO₂ y el H₂S en presencia de las primeras gotas de condensado forma una mezcla ácida que corroe el acero por lo que es indispensable utilizar tuberías y paredes de los condensadores de acero inoxidable. Otro aspecto que el fabricante de turbinas valorará enormemente es que le permitan diseñar los pasos de su turbina para vapor puro en lugar de vapor geotérmico con algunas partículas agua (salada) que erosiona y corroe. Es decir su diseño de la última rueda de álabes se puede extender a las mismas restricciones de las turbinas nucleares. Es decir, no está demás echarle un ojo a un ciclo indirecto en el que todos los problemas del fluido geotérmico quedan restringidos al área de intercambiadores de calor. Todo lo corrosivo e incrustante del fluido geotérmico queda en los tubos y placas de un intercambiador primario donde se dejan las facilidades para limpiarlo y repararlo,

¹ Elders (2009), Iceland Deep Drilling Project Finds Magma

² Hiriart et al (2010), Hydrothermal Vents and Electricity Generation

mientras que todo el circuito de la turbina se transforma en un caso clásico de planta termoeléctrica operando con agua desmineralizada y sin gas.

Por todas las razones anteriores hemos considerado interesante y útil estudiar un ciclo indirecto, binario, operando a temperaturas altas en el primario

En este trabajo de tesis se plantea primero un amplio examen de los posibles fluidos que se podrían utilizar como fluido de trabajo, o secundario. Se ven las propiedades de decenas de fluidos candidatos para estos procesos y se clasifican proponiendo una tabla final de los mejores candidatos bajo diferentes circunstancias. Luego se presenta un programa de balance termodinámico que permite introducirle las ecuaciones constitutivas de varias sustancias de manera que se pueda operar el ciclo en las condiciones que se desean estudiar.

Finalmente, se hace un recuento de los casos estudiados de manera de ofrecer un menú de fluidos apropiados para diferentes configuraciones de fluido caliente. Además se da una semblanza de lo que se encontró en esta tesis, a la luz de las nuevas tecnología que en este momento se están estudiando para los nuevos sistemas geotérmicos.

A consideración del autor, este trabajo sienta las bases para otros estudios más sofisticados, con precalentadores y sobrecalentadores y con aprovechamiento de la expansión de los gases para enfriamiento de componentes.

1.

2. Geotermia Convencional y no Convencional

La geotermia convencional se encarga de explotar los yacimientos de alta ($T > 300$), media ($300 > T > 150$) y baja ($T < 150$) temperatura para generación de electricidad, para tal efecto, la exploración se acota a localizar yacimientos que a esas condiciones se encuentran comúnmente en un rango de entre 1000 y 3000 metros de profundidad, esas profundidades se pueden lograr usando técnicas de exploración y perforación ampliamente utilizadas alrededor del mundo.

En el yacimiento, el fluido geotérmico puede encontrarse como líquido, vapor o como mezcla bifásica; de esto depende importantemente la forma en que será extraído a la superficie, así por ejemplo, en los reservorios de vapor el fluido se extrae por flujo natural, mientras que en los de líquido puede ser extraído por induciendo el flujo con una técnica apropiada, o bien por bombeo.

Una vez que el recurso ha sido traído a la superficie, se emplean diversas tecnologías para la generación de electricidad, para el caso de recurso de vapor se acondiciona el vapor (presión y humedad), según lo exija la central de generación y posteriormente se conduce una turbina de vapor geotérmico cuyo escape puede ser a contrapresión o a condensación; para el caso de recurso en mezcla bifásica, se hace necesaria una etapa previa de flasheo y separación. En el caso de los yacimientos de líquido subenfriado e incluso para el líquido remanente en el separador del caso anterior, se hace necesario el uso de un ciclo binario.

La energía geotérmica se considera una tecnología madura y ha demostrado a la largo de su evolución una elevada competitividad y un sinnúmero de ventajas técnicas, económicas y ecológicas que, sin duda, la ponen dentro de la élite de tecnologías preferidas por el mercado energético global; por otro lado la geotermia presenta algunas desventajas importantes que han limitado un boom geotérmico, tal es el caso de la distribución localizada de los recursos geotérmicos (que limitan su implementación geográfica) y la baja eficiencia del proceso (reducida potencia instalada por pozo productor).

Así entonces, la tendencia en investigación y desarrollo se ha enfocado a resolver algunos de los problemas que limitan a la geotermia y a optimizar el proceso en general, con miras en volver a la geotermia un referente económico en producción energética y con aplicabilidad universal.

2.1. Sistemas Geotermicos Mejorados (EGS)

Para poder dar aplicación universal energía geotérmica es preciso tener la facultad de instalar una central en lugares que inicialmente no cumplen con las condiciones de un yacimiento geotérmico (calor y fluido), esto le da una plusvalía importante al proyecto con su beneficio asociado en logística y economía. Con estos argumentos fue desarrollada la

tecnología *Enhanced Geothermal System* (EGS)³; el sistema consiste en crear un “yacimiento” artificial, es decir, se localiza una región de roca permeable caliente en el subsuelo (inicialmente seca), se perfora un pozo profundo (pozo de inyección) capaz de introducir agua hasta la región localizada, se inyecta agua fría, el agua adquiere el calor de la roca y lo transporta a la superficie por medio de un pozo secundario (pozo productor), el agua caliente ya en la superficie se puede explotar con un ciclo flash a condensación o bien en un ciclo binario; las investigaciones recientes se han orientado en el uso de dióxido de carbono como fluido de trabajo, buscando una mejor recuperación de calor (debido a las propiedades termo-físicas del CO₂) y aprovechando las pérdidas del fluido como secuestro geológico de carbono⁴.

Cuando las grietas y poros naturales no permiten que el flujo sea suficiente, la permeabilidad puede ser mejorada mediante el bombeo de agua fría a alta presión en el pozo de reinyección, esto induce fracturamiento en el granito aumentando la permeabilidad. El agua viaja a través de las fracturas captando mayor calor de la roca y con ello incrementando la eficiencia del sistema.

2.2. Geotermia Supercrítica

Otra de las líneas importantes de investigación es la de geotermia supercrítica, que precisamente es la razón de proponer este trabajo; éste tipo de geotermia no convencional propone la explotación de yacimientos muy profundos (5000 m o más) donde se encuentran fluidos geotérmicos que, por su proximidad a los cuerpos magmáticos, alcanzan condiciones termodinámicas supercríticas, es decir, temperatura y presión superiores al punto crítico para el agua (T_c=374 °C y P_c=221 Bar). El *Iceland Deep Drilling Project* (IDDP) es el proyecto pionero en la incursión de estos recursos el cual pretende la extracción de fluidos supercríticos con temperaturas de entre 450 y 600 °C a una presión de alrededor de 300 Bar, la propuesta de generación en superficie se basa en un ciclo binario agua-agua que, según revelan las estimaciones termodinámicas preliminares, tendría un potencial de instalación superior en un orden de magnitud al de una central geotérmica convencional, esto considerando la misma tasa de extracción del recurso⁵.

En la geotermia uno de los retos más difíciles de afrontar es lograr una buena probabilidad de éxito en la localización de los yacimientos geotérmicos; para tal efecto se debe echar mano de diversas disciplinas y sus técnicas: geofísica, geoquímica, geología y geohidrología; finalmente la tarea queda concluida satisfactoriamente cuando se tienen los pozos productores en operación.

³ US Department of Energy (2004), Geothermal Technologies Program, Enhanced Geothermal Systems.

⁴ Pruess (2006), Enhanced Geothermal Systems (EGS) Using CO₂ as Working Fluid- A Nobel Approach for Generating Renewable Energy with Simultaneous Sequestration of Carbon

⁵ Fridleifsson (2008), Iceland Deep Drilling Project, Drilling into a Supercritical Geothermal System

Para la ubicación de un campo geotérmico es necesario primero identificar un sitio candidato, esto se logra tradicionalmente siguiendo el indicio de las manifestaciones hidrotermales superficiales. Para seleccionar un lugar como candidato será necesaria la intervención de especialistas en la materia que, con su experiencia y la información generada continuamente en el proceso, puedan ubicar los lugares de posible actividad geotérmica. Una vez localizado el sitio candidato se hace necesario contar con información más detallada de las características del posible yacimiento, para ello se necesita realizar un modelo geológico de la zona en cuestión, estudios geofísicos detallados (Sondeos Eléctricos Verticales, Transitorios Electromagnéticos, Gravimetría y prospección sísmica), estudios geoquímicos (geotermometría, isotopía radioactiva, etc.).

La presencia de recursos geotérmicos supercríticos se puede inferir si se centra la atención en el gradiente de temperatura en campos geotérmicos actualmente explotados; la temperatura máxima que puede tener un yacimiento de líquido dominante está limitada por la temperatura de saturación del agua a la presión a esa profundidad, si el registro de temperatura sigue un perfil por debajo de la curva de saturación, se considera que no existe gran probabilidad de encontrar recursos geotérmicos supercríticos, por el contrario, si el registro de temperatura sigue el comportamiento de la curva de saturación del agua, es indicio de que es posible alcanzar las condiciones supercríticas si se sigue perforando (entre 3500 y 5000 metros de profundidad).

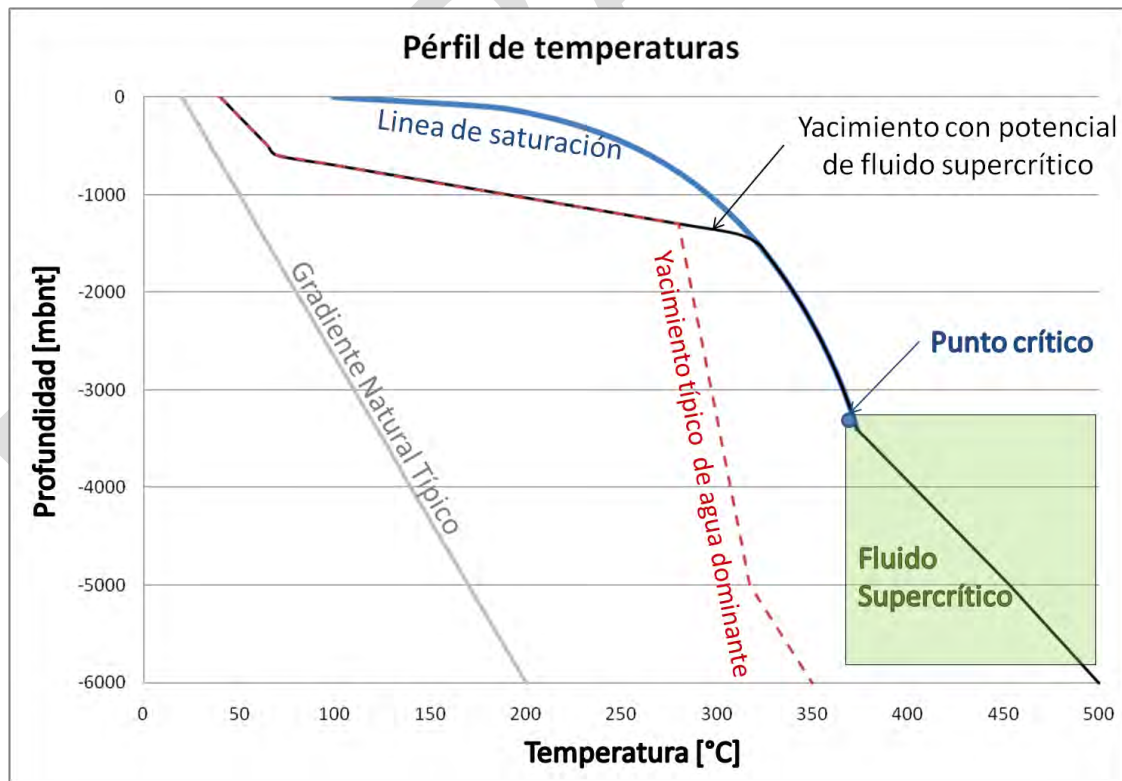


Figura 1 Perfil de temperaturas, indicio de yacimiento supercrítico

Una vez que el agua alcanza las condiciones críticas de presión y temperatura, tienen lugar grandes cambios del comportamiento termo-físico de la sustancia, esto es debido a que en condiciones supercríticas coexisten en una misma fase el líquido y el vapor, esto proporciona condiciones especiales al fluido. Una de las características importantes en éste estudio que adopta el agua supercrítica es la gran capacidad de disolver elementos y una alta capacidad calorífica, estas son características propias de los líquidos, en contraste, el agua adopta una gran fugacidad y baja viscosidad a esas condiciones, características propias de los gases⁶, esta combinación de propiedades hace de los fluidos geotérmicos supercríticos un excelente medio de adquisición y transporte de elementos disueltos y energía desde un yacimiento muy profundo hasta la superficie, gracias a la gran capacidad que adoptan los fluidos para disolver sales, los hace realmente inapropiados para su utilización directa en centrales de generación por lo que se hace indispensable un ciclo binario para poder explotar estos recursos de una manera económicamente competitiva.

La figura 2 muestra el diagrama temperatura-entropía para el agua, donde se muestran las fases existentes en un amplio rango de condiciones, es claro que el fluido geotérmico supercrítico, tiene un contenido energético mayor al de un yacimiento típico de agua dominante, además por sus propiedades hidráulicas puede transportar una mayor cantidad de energía por unidad de volumen y con menores pérdidas.

⁶ <http://sfe.vemt.bme.hu/angol/supercritical.html>

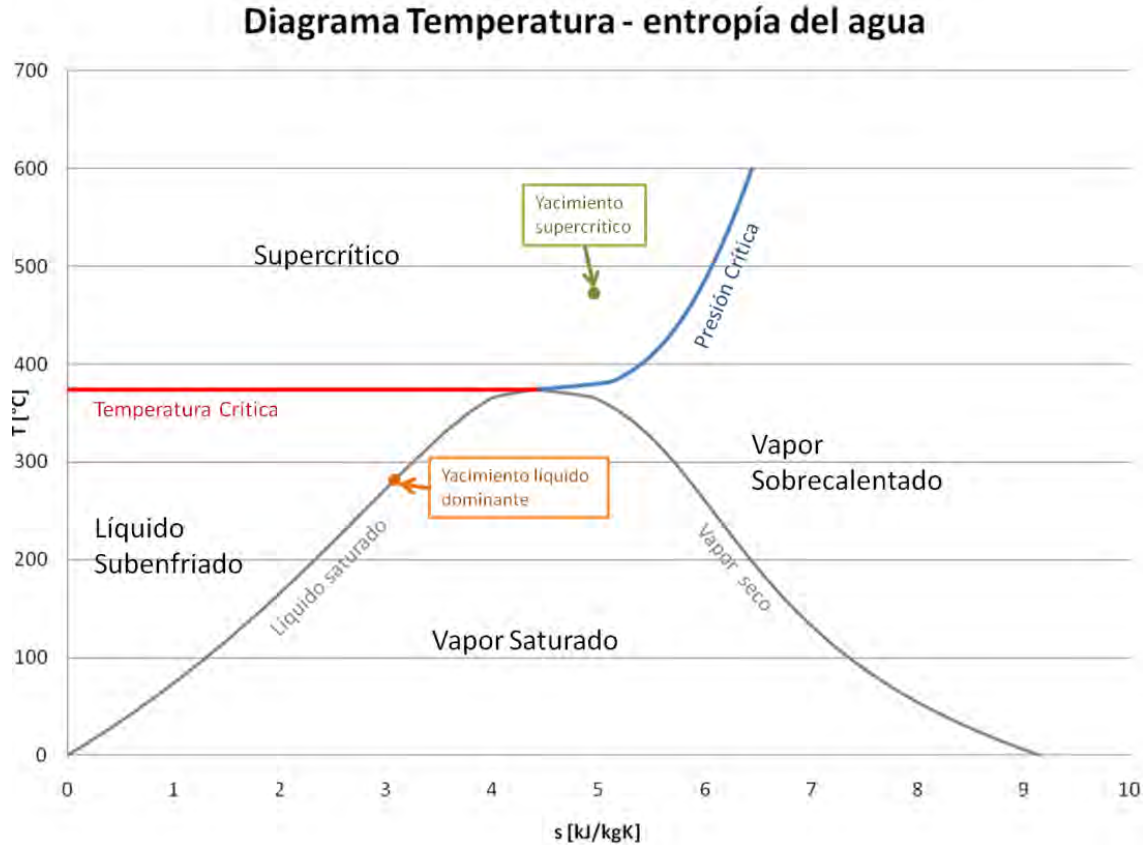


Figura 2 Diagrama T-s del agua mostrando las fases presentes

La física y la química de los fluidos supercríticos es de considerable interés por el potencial que tienen como fuentes de energía⁷ y para entender problemas como: el enfriamiento de intrusiones ígneas, el metamorfismo de contacto, la formación de minerales hidrotérmicos, etc.⁸

Se ha dicho que cerca del punto crítico ocurren cambios importantes en las características físicas del agua, debido a esos cambios, entre ellos la solubilidad de los minerales, el fenómeno supercrítico desempeña un papel importante en la reacción del agua con la temperatura de la roca y el transporte de materiales disueltos⁹.

El primer pozo del proyecto IDDP fue perforado en Krafla en el primer semestre de 2009; el pozo fue diseñado para alcanzar un sistema hidrotermal de alta temperatura (400 a 600 °C) con fluido sobrecalentado o supercrítico.

La química del sistema geotérmico en Krafla ha sido ampliamente estudiada en los últimos años. En la mayoría de áreas donde existen pozos profundo (>> 2000 m de profundidad) se

⁷ Elders, (2010). The Science Program of the Iceland Deep Drilling Project (IDDP): a Study of Supercritical Geothermal Resources.

⁸ IDDP SAGA Report, 2002.

⁹ Op cit 7

han observado emanaciones ácidas cerca del fondo que provocan severa corrosión elementos compuestos de hierro y deposición de sulfuros, silicatos, óxidos y sílice. La acidez está asociada el anión cloruro y se ha sugerido que en profundidad puede haber una almacén de agua salada donde existe cloruro de hidrogeno hirviendo. El cloruro de hidrógeno forma ácido clorhídrico rápidamente cuando se satura con agua; también se ha especulado que los fluidos ácidos puede ser un fenómeno que se produce a una cierta profundidad y podría limitar pozos más profundos. El origen de la acidez y la manera de lidiar con ello es uno de los desafíos principales del IDDP. Los resultados de la química de los fluidos de los primeros pozos muy profundos y la interpretación de los conocimientos previos sobre la zona permitirán un mejor entendimiento de la geotermia supercrítica, lo que dará lugar a mejores conclusiones acerca de su manejo en superficie¹⁰.

La composición química de los fluidos supercríticos en la corteza terrestre es diferente en diversos ambientes geológicos, en diversos lugares y en diversas horas en un lugar dado y además los fluidos supercríticos pueden contener gases volcánicos.

Islandia es por el momento el único país que ha iniciado la perforación exploratoria de geotermia supercrítica con el proyecto pionero de esta tecnología IDDP, sin embargo, otros países se han unido al esfuerzo Islandés de renacer a la geotermia. Estados Unidos tiene planes de iniciar proyectos de esta índole en la costa noroeste del pacífico, la península de Alaska, Hawái y otras regiones volcánicas jóvenes¹¹, Italia está impulsando fuertemente éste desarrollo por la conducto del Programa Intercontinental de Perforación Científica (ICDP por sus siglas en inglés), los lugares objeto de la exploración son: la caldera de los campos Flégreos¹² al sur del país, y el sistema de Larderello¹³ en la toscana.

¹⁰ Armannsson (2010), IDDP The Chemistry of the Krafla Geothermal System in Relation to the IDDP Well

¹¹ [Buscar](#)

¹² http://www.icdp-online.org/front_content.php?idcat=1032

¹³ Bertini (2006), Geological Estructure of a Long-Living Geothermal System, Laderello, Italy.

3. Selección del Fluido de Trabajo para Ciclo Binario

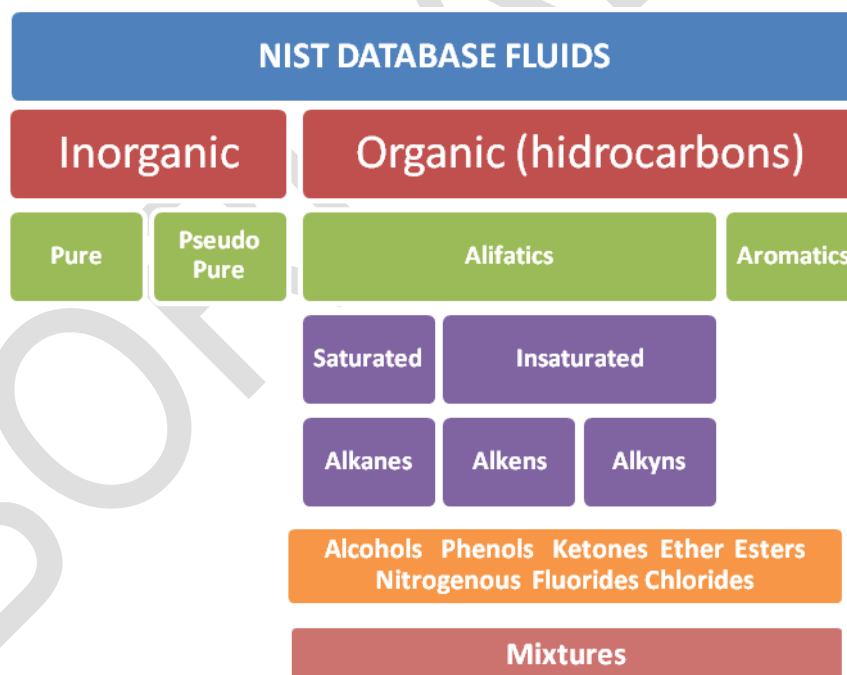
Este capítulo aprovecha el camino ya andado por aquellos que se han dedicado a recolectar y formar una buena base de datos de los fluidos que eventualmente pudieran servir para ser usados como fluido de trabajo en estas plantas. Luego viene la selección del mejor fluido de trabajo; en donde establecieron criterios de selección para categorizar los más de 130 descritos en la literatura. Luego en el se desarrollan las herramientas de cálculo pertinentes y se aplican todos los fluidos disponibles.

3.1. Fluidos Candidatos

Se consideraron como candidatas todas las sustancias puras, pseudo puras y mezclas predefinidas en el software comercial REFFPROP¹⁴ creado por el NIST (National Institute of Standards and Technology); asimismo se utilizó la interfaz VBA para interactuar con el programa en una hoja de cálculo. La lista de los 138 fluidos disponibles se presenta en el Anexo 1.

Las sustancias incluidas en la base de datos se puede clasificar en:

Tabla 1 Clasificación de Sustancias Incluidas en el Análisis



Sin entrar en detalles de la naturaleza, nomenclatura o estructura de ellas, todas las sustancias contenidas en la base de datos pueden ser clasificadas en laguna de las categorías anteriores; así entonces, fueron evaluadas sustancias de todas las familias.

¹⁴ NIST (2007), REFFPROP Standard Reference Database 23, Version 8.0

Las sustancias inorgánicas presentes en la base de datos tienen una presencia poco nutrida pero no por ello menos importante, algunas sustancias inorgánicas puras consideradas: Helio, Deuterio, agua, amonio, etc.; pseudo puras: aire.

La presencia más importante fue de fluidos orgánicos, teniendo fluidos simples (HC) de cadena abierta (alifáticos): isopentano, isobutano, isohexano, etc.; de cadena cerrada o anillo (aromáticos): benceno, tolueno, ciclohexano, etc.; con radicales oxigenados, alcoholes y fenoles: metanol, etanol, etc; Cetonas: acetona; fluorizados (HFC): R23, R32, etc.; Cloro-fluorizados (HCFC): R11, R12, etc.

Finalmente se consideraron algunas mezclas predefinidas (contenidas también en el Anexo 1) que contienen elementos de diversas categorías previamente definidas, dichas mezclas buscan regularmente obtener propiedades termofísicas específicas incorporando otros elementos; por ejemplo, en el caso de la mezcla R406a se combina un alcano (isobutano 4%) y dos HCFC (R22 55% y R142b 41%) para eliminar la inflamabilidad del refrigerante obteniendo características parecidas al R12. Otras mezclas y sus componentes son presentadas en el Anexo 1.

3.2. Método de comparación

Para realizar una adecuada selección del fluido de trabajo, será necesario definir aquellos criterios que se consideren adecuados para el buen comportamiento del sistema, evaluar cada uno de los fluidos candidatos, seleccionar los más aptos y discriminar los menos.

En este apartado se describirán a detalle los criterios que se consideraron como más apropiados para la selección de un fluido de trabajo para un ciclo binario; se explica el contexto teórico de cada criterio, y se presenta la metodología para evaluar cada sustancia candidata, los criterios a evaluar serán:

- Eficiencia
- Humedad en la turbina
- Tamaño de la turbina
- Aspectos ambientales y de salud

Se utilizó el método matricial de decisión de criterios múltiples para comparar cada fluido; el método consiste en evaluar el rendimiento de los fluidos en cada criterio, asignar una calificación normalizada (valor de 0 para el peor y 1 para el mejor) según su desempeño y construir una matriz “A” de calificaciones:

$$A = [\textit{fluidos} \times \textit{criterios}]$$

Posteriormente deberá asignarse una calificación normalizada a cada criterio para ponderar su importancia en la comparación, es decir, al evaluar un fluido se debe definir si es de

mayor importancia la eficiencia o los aspectos ambientales que los demás criterios, por tanto en la comparación deberá incluirse un vector de importancia normalizada “b”:

$$b_{importancia} = [criterios \times 1]$$

La importancia que se asignó (propuesta del autor) a cada uno de los criterios fue: Eficiencia=0.6, Humedad=0.15, Diámetro= 0.1, Ambiental=0.15

Así entonces se tendrá un vector “R” con la calificación final de los fluidos, el cual servirá para crear un ranking de los mejores, los aceptables y los inapropiados para un ciclo binario según los criterios adoptados en éste estudio.

$$R_{final} = [fluidos \times criterios] \times [criterios \times 1] = [fluidos \times 1]$$

En todo caso el programa desarrollado permite cambiar los valores de clasificación aquí utilizados ya que éstos pueden variar según su aplicación específica o según las normas del país de que se trate.

3.3. Criterios de Selección

3.3.1. Eficiencia

La eficiencia del ciclo es probablemente el parámetro de mayor importancia para seleccionar un fluido de trabajo, ya que en la medida que sea obtenida una mejor eficiencia, el ciclo entregará mayor potencia con un recurso de energía fijo, o en otras palabras, consumirá menor recurso para entregar la misma potencia; lo que hará al proyecto más atractivo y competitivo.

De manera general, la eficiencia de cualquier maquina térmica es la relación entre el trabajo mecánico entregado y el calor que es suministrado:

$$\eta_c = \frac{\dot{W}_e}{\dot{Q}_s}$$

Donde η_c es la eficiencia del ciclo, \dot{W}_e es la potencia mecánica entregada y \dot{Q}_s es el calor suministrado. En la figura 3 se definen los estados termodinámicos de un ciclo Rankine ideal, en el cual se realiza intercambios de calor isobáricos y expansión/bombeo isentrópicos.

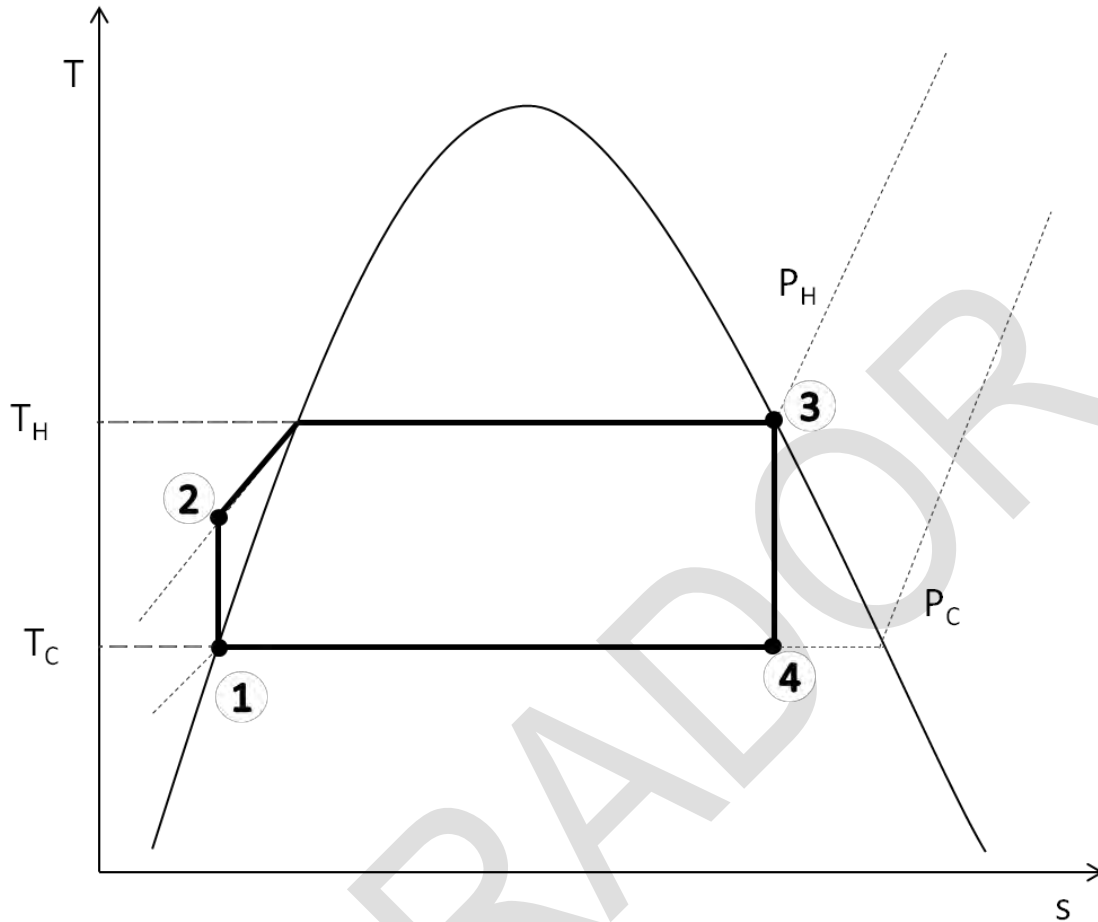


Figura 3 Diagrama general T-s de un ciclo Rankine (T_H, P_H condiciones de evaporación y T_C, P_C condiciones de condensación).

Así entonces, la eficiencia del ciclo ideal se puede calcular como:

$$\eta_c = 1 - \frac{h_4 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Donde η_c es la eficiencia del ciclo, h es la entalpía y los subíndices refieren a los estados 1,2,3,4 respectivamente.

Se calculó la eficiencia teórica de cada fluido en un ciclo Rankine ideal y se comparó contra la eficiencia de Carnot asignando la calificación correspondiente. Los valores de eficiencia para cada fluido a las condiciones definidas (Evaporación: $T_H=100, 150, 200, 250, 300, 350^\circ\text{C}$ y Condensación: $T_C=20, 30, 40^\circ\text{C}$) y la calificación asignada puede encontrarse a en el Anexo 2.

Es importante recalcar que se evaluó el ciclo termodinámico aún cuando las condiciones de evaporación sobrepasaran al punto crítico de las sustancias, es decir, se calcularon también

las eficiencias de ciclo supercrítico que a pesar de tener un buen rendimiento no es utilizado hasta la fecha¹⁵.

Cabe mencionar que el fluido que alcanzó una mejor evaluación en éste criterio fue el agua seguido de dos alcoholes: el metanol y el etanol.

3.3.2. Humedad en la turbina

La humedad en el escape de la turbina es un parámetro que para muchos fabricantes y operadores de centrales es un grave problema, ya que presenta erosión en las últimas etapas de las turbinas; el problema se resuelve buscando un fluido de trabajo que expanda isentrópicamente en la región de vapor saturado o bien uno que al expandirse caiga en la zona de sobrecalentado del fluido, sin embargo en este último caso, el calor a ceder para llevar nuevamente el vapor a la región de saturación (después de la expansión en la turbina) merma de manera importante la eficiencia del ciclo o, en el mejor de los casos, hace necesaria la implementación de un recuperador de calor.

Por lo anterior, se hace una condición deseable (pero no estrictamente necesaria) contar con un fluido de trabajo cuya expansión sea siempre cercana a la línea de vapor saturado y seco, esta característica puede ser evaluada conociendo la variación de la entropía de la línea de vapor saturado con respecto a la temperatura de evaporación del ciclo, por lo que se propone la siguiente metodología¹⁶ partiendo de la definición de entropía (asumiendo la fase líquida como incompresible):

$$dQ = T ds$$

$$ds = \frac{dQ}{T} = \frac{Cp dT + \Delta H_H}{T}$$

$$\left. \frac{ds}{dT} \right|_{T=T_H} = \frac{Cp + \Delta H_H}{T_H dT_H}$$

$$\left. \frac{ds}{dT} \right|_{T=T_H} = \frac{Cp}{T_H} + 2 \frac{d(\Delta H_H)}{d(T_H^2)} - \frac{\Delta H_H}{T_H}$$

Donde s es la entropía, Cp es el calor específico a presión constante, T es la temperatura, T_H y ΔH_H son la temperatura y la entalpía de evaporación respectivamente.

¹⁵ Marcuchilli et al (2010), Optimizing Binary Cycles Thanks to Radial Inflow Turbines.

¹⁶ Liu et al (2004), Effect of working fluids

La anterior relación puede simplificarse para un mejor manejo de los datos, según la relación de Watson¹⁷:

$$\xi \approx \left. \frac{ds}{dT} \right|_{T=T_H}$$

$$\Rightarrow \xi = \frac{Cp}{T_H} - \frac{\frac{nT_{rH}}{1 - T_{rH}} + 1}{T_H^2} \Delta H_H$$

Donde T_{rH} es la temperatura reducida de evaporación, n es el exponente propuesto por Watson cuyo rango sugerido es: $n=0.375-0.38$ y las demás variables ya han sido definidas.

En la anterior ecuación ξ representa la pendiente de la línea de vapor seco y puede realizarse la siguiente clasificación:

- $\xi < 0$ son fluidos húmedos
- $\xi \approx 0$ son isentrópicos (se consideró un rango de $-0.5 \leq \xi \leq 0.5$ kJ/kgK² para que los fluidos pueda ser considerados como isentrópicos).
- $\xi > 0$ son fluidos secos

En la figura 4 se muestra un esquema de la curva de saturación para tres fluidos típicos representativos de cada clasificación; el amonio que representa a los húmedos, el R141b a los isentrópicos y el decano a los secos.

¹⁷ Poling et al (2001), The properties of gases and liquids

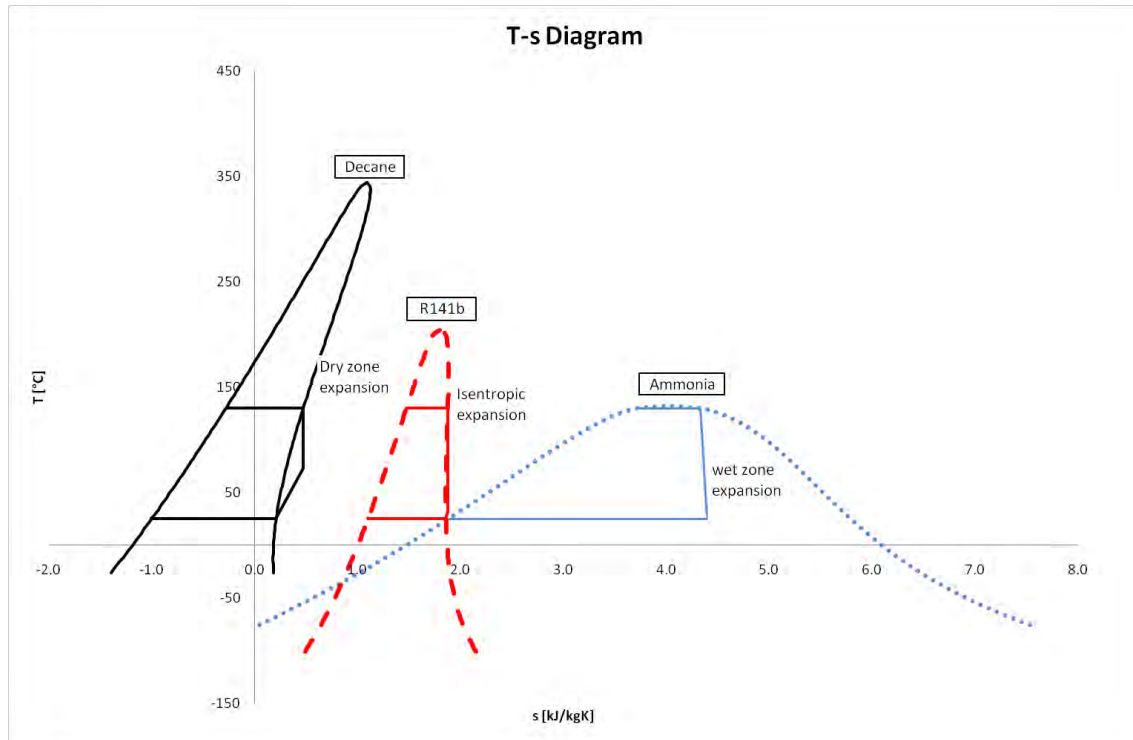


Figura 4 Diagrama T-s de fluidos típicos clasificados por humedad

Se evaluaron todos los fluidos en el punto normal de evaporación y se compararon contra la condición ideal, es decir, se asignó con una regresión lineal la calificación máxima al más cercano (en valor absoluto) a $\xi = 0$ y la mínima al más lejano. Los resultados de ξ , clasificación de humedad y calificación del criterio se presentan en el Anexo 3.

El fluido que alcanzó la mejor calificación en este criterio fue el R115 seguido del R124, R123, Benceno y R141b

3.3.3. Tamaño de turbina

Sin duda el tamaño de la turbina impacta en algunos casos tanto como la misma eficiencia, ciertamente es preferible una turbina pequeña que una grande. Un buen indicador para estimar el tamaño que deberá tener una turbina es el diámetro de la última rueda ya que evidentemente será la de mayor tamaño. Esta tarea es compleja y generalmente se realiza definiendo una velocidad específica y un diámetro específico para luego ingresar con estos valores a las curvas experimentales que muchos investigadores han obtenido¹⁸. Sin embargo, como una forma aproximada para encontrar la medida de esa última rueda se puede seguir el procedimiento básico para diseño de turbinas.

¹⁸ Barber & Nichols (2010), <http://www.barber-nichols.com/>

Para una turbina de impulso en régimen sónico, la eficiencia en general se maximiza con la relación¹⁹:

$$u = \frac{1}{2}C$$

Donde u es la velocidad del álabe y C es la velocidad del vapor a la salida de las toberas, en este caso será igual a la velocidad del sonido en el medio, a sabiendas de que hay muchas turbinas que usan velocidades mayores que la del sonido.

Por otra parte, la velocidad tangencial de un álabe se puede evaluar en función de la rotación del eje:

$$u = f\pi D$$

Donde f es la frecuencia de rotación y D es el diámetro medio de la rueda.

Combinando apropiadamente las dos anteriores ecuaciones, es posible determinar el diámetro para la última rueda:

$$D = \frac{C}{2\pi f}$$

Para conocer la velocidad del sonido en el vapor de la última rueda, deberá recurrirse a la relación²⁰:

$$C = \sqrt{\frac{kP}{\rho}}$$

Donde C es la velocidad del sonido, k es el índice adiabático, P es la presión y ρ es la densidad.

Finalmente para calcular el diámetro de la última rueda la relación obtenida es:

$$D = \frac{\sqrt{\frac{k_C P_C}{\rho_C}}}{2\pi f}$$

Donde D es el diámetro medio de la última rueda, k_C , P_C , ρ_C son el índice adiabático del vapor, la presión y la densidad en el condensador y f es la frecuencia de giro del rotor.

¹⁹ Schegliaiev (1978), Turbinas de vapor

²⁰ Fox (1998) Introduction to Fluid Mechanics

En general una turbina de poca potencia opera a frecuencias o velocidades de rotación muy altas (para disminuir su diámetro y su volumen) y es acoplada al generador (frecuencia según el país) con engranes de reducción. Sin embargo para fines comparativos de los 130 fluidos, se simplificó la metodología y se utilizaron las velocidades de rotación estándar (50 y 60 Hz). Se calculó el diámetro asociado a la última rueda para cada fluido a diferentes condiciones ($T_c=20,30,40^\circ\text{C}$ y $f= 50, 60$ Hz); se asignó la calificación mayor al fluido que requiere el menor diámetro y la peor calificación al que requiere el mayor; el detalle de los diámetros medios calculados y la calificación obtenida se encuentra en el Anexo 4.

El fluido que alcanzó la mejor calificación en este criterio fue el hexafluoruro de azufre seguido del RC318 y el R13.

3.3.4. Aspectos ambientales y de salud

Para evaluar el impacto al ambiente y a la salud que tienen las sustancias estudiadas, se realizó la búsqueda de dicha información en la base de datos del Programa Internacional en Seguridad Química²¹, de entre la información disponible, se consideraron las siguientes características como las más importantes a evaluar en el comportamiento de las sustancias:

- Temperatura de autoignición. Para un manejo seguro de las condiciones en el ciclo debe considerarse la temperatura de auto ignición, ya que, si llegara a excederse ésta temperatura en el manejo hidrocarburos, podría existir una explosión que pondría en grave riesgo la seguridad de los operarios, el medio ambiente y la vida de la planta.
- Toxicidad. Un ciclo binario debe diseñarse para evitar fugas de las sustancias peligrosas que usa, sin embargo las eventualidades siempre están latentes, por ello, parte del diseño implica también seleccionar un fluido de trabajo inocuo al ambiente y a los operarios. El efecto que tiene la sustancia en el ambiente como gas de efecto invernadero también se consideró en éste apartado, ya que los HC, CFC y HCFC están fuertemente restringidos en la mayoría de las regulaciones ambientales.
- Flamabilidad. El fluido de trabajo puede llegar a incendiarse por contacto con agentes externos, por lo tanto un fluido de trabajo será más seguro en función de su grado de flamabilidad.

Se realizó la evaluación cualitativa de cada fluido teniendo en cuenta lo anterior y se asignó una calificación por cada característica no deseable, se asignó la calificación más alta al de temperatura de auto ignición más elevada, la menor toxicidad y menor; por el contrario se asignó la calificación más baja a la mínima temperatura de auto ignición, la mayor toxicidad y mayor flamabilidad; los datos que no fueron encontrados se reportan como ND (No disponible) y eso se evaluó con calificación nula, con la excepción de la temperatura de auto ignición cuya ausencia es favorable para la selección de una sustancia, además se consideró que la ausencia del fluido en la base de datos sugiere que no es un fluido de

²¹ IPCS <http://www.inchem.org/>

amplia utilización, por lo que se reitera que la presencia de un ND sea castigado en la evaluación. Existen otros factores importantes a ser evaluados, como la disponibilidad de la sustancia, la regulación ambiental e industrial y diversas cuestiones económicas que salen del alcance del presente estudio y sin embargo podrían modificar el ranking de fluidos Anexo 5.

El fluido que alcanzó la mejor calificación fue el agua seguido del bióxido de carbono y el amoniaco.

BORRADOR

3.4. Selección del fluido

Finalmente al obtenerse el vector “R” (véase Anexo 6) con la calificación final, se construye un ranking de los fluidos, comenzando la lista con el más apropiado seguido del segundo mejor y así sucesivamente. Ciertos fluidos presentan en alguna de las evaluaciones una calificación nula, esto es, en la mayoría de los casos, porque el programa REFPROP presenta valores de error en el cálculo de las propiedades a dichas condiciones. También fueron discriminados aquellos fluidos cuyo punto crítico se encuentre por debajo de la temperatura de condiciones estándar²² definidas por el NIST (20°C).

En la 1 se presenta el *top* 10 de los fluidos mejor posicionados en el ranking; el detalle de los resultados de la evaluación y el ranking total se encuentra en el Anexo 6.

Tabla 2 Ranking de los fluidos mejor evaluados

Ranking	Fluido	Eficiencia	Humedad	Diámetro	Ambiental y Salud	Calificación Total
1	Benceno	0.44	0.149	0.071	0.05	0.71
2	Agua	0.51	0.041	0.000	0.15	0.70
3	Acetona	0.43	0.141	0.062	0.06	0.69
4	Tolueno	0.44	0.141	0.075	0.03	0.68
5	Etanol	0.45	0.122	0.053	0.06	0.68
6	R113	0.37	0.146	0.091	0.05	0.65
7	R141b	0.39	0.149	0.082	0.03	0.65
8	R21	0.39	0.140	0.078	0.03	0.64
9	Ciclo-hexano	0.40	0.139	0.073	0.01	0.62
10	Decano	0.37	0.121	0.086	0.03	0.60

Los resultados de la comparación demuestran que existe toda una gama de posibles fluidos a utilizar (100 fluidos técnicamente aplicables) pero definitivamente la selección del fluido más adecuado dependerá del criterio de diseño adoptado y de la aplicación específica (disponibilidad y costo *in situ*, regulación ambiental, etc.); así por ejemplo: para ORMAT las sustancias más adecuadas suelen ser el isopentano, isobutano y n-pentano²³, para Barber & Nichols el tolueno y los HCFC's²⁴, para Turboden y Adoratec el OMTS y para Energent, Infinity Turbine y Cryostar el R134a²⁵.

²² Lindstrom (2008) Chemical web book

²³ Johnson *et al* (2010), Ormat: Low-Temperature Geothermal Poer Generation

²⁴ Batton (2000), Organic Rankine Cycle Engines for Solar Power

²⁵ Quoilin (2009), Tecnological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems

Definitivamente la elevada eficiencia térmica en el ciclo a altas temperaturas, su inocuidad ambiental y su abundancia natural hace del agua un candidato fuerte para su selección en un circuito secundario; si se incorpora un análisis económico seguramente favorecerá al agua en la selección por lo tanto éste será el fluido secundario que se use adelante para los cálculos.

El análisis de eficiencia es apropiado para realizar la selección del fluido pero debe realizarse un examen de las condiciones del ciclo y su interacción con el intercambiador de calor; la eficiencia global de recuperación y el consumo específico de calor son parámetros más apropiados para evaluar el rendimiento de un ciclo binario que la eficiencia del ciclo.

BORRADOR

4. Ciclo Binario de Alta Temperatura

En este capítulo se desarrollaran los argumentos técnicos para evaluar la aplicación de un ciclo binario para geotermia supercrítica, se calcularán las condiciones termodinámicas y se evaluará el rendimiento del ciclo.

De manera general, un ciclo binario utiliza la energía de un recurso caliente para generar electricidad por medio de un circuito cerrado del fluido de trabajo; el calentamiento se lleva a cabo en un conjunto de intercambiadores de calor, la configuración típica es: el fluido secundario ingresa a un precalentador (donde se lleva a punto de saturación), posteriormente a un evaporador con su respectivo domo, después se ingresa a la turbina que es donde entregará la potencia, después a un condensador, y finalmente a una bomba que igualará la presión y cerrará el circuito. Por su parte el fluido geotérmico, ingresa en primera instancia al evaporador y posteriormente al precalentador antes de ser rechazado.

4.1. Termodinámica del Ciclo

Para evaluar la aplicabilidad de un ciclo binario es preciso modelar la termodinámica del ciclo, para tal efecto habrá que definir cada uno de los procesos que se llevan a cabo, los estados termodinámicos y los parámetros que serán indicadores del rendimiento del ciclo. Para el modelado térmico se deberán definir en cada estado las propiedades:

- Temperatura: T [$^{\circ}\text{C}$]
- Presión: P [Bar]
- Calidad: x [%]
- Entalpía específica: h [kJ/kg]
- Entropía específica: s [kJ/kgK]
- Densidad: ρ [kg/m^3]
- Flujo másico: m [kg/s]

Para concluir acerca del rendimiento del ciclo deberán calcularse los parámetros indicadores siguientes:

- Potencia Entregada
- Eficiencia Térmica del Ciclo: η_T
- Eficiencia del intercambiador de calor: η_{HX}
- Eficiencia global de recuperación: η_r

Se utilizará la nomenclatura mostrada en la figura 5 para referirse a cada estado termodinámico:

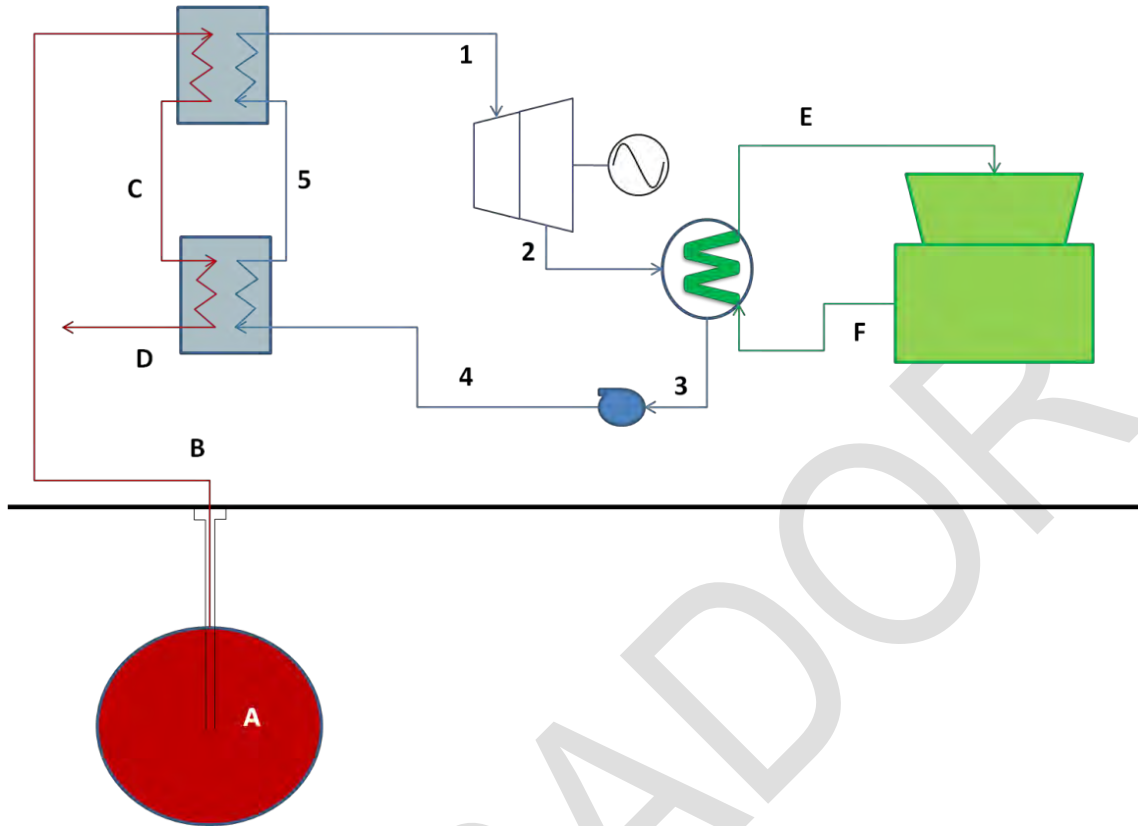


Figura 5 Ciclo Termodinámico y nomenclatura para cada estado.

En primer lugar se deben conocer las condiciones termodinámicas del yacimiento; para el caso de geotermia supercrítica es más que evidente que las condiciones en el yacimiento serán supercríticas (presión y temperatura por encima del punto crítico), sin embargo debe tenerse claro que en muchos casos estas condiciones pueden no ser alcanzadas, o pueden verse modificadas en el tiempo.

- T_A = se define (supercrítica)
- P_A = se define (supercrítica)
- $h_A, s_A, x_A, \rho_A @ T_A, P_A$ de tablas de vapor
- se define \dot{m}_A

El siguiente paso es conocer las condiciones térmicas en la cabeza del pozo, para ello debe tenerse en mente que existirá una importante caída de presión asociada al cambio de elevación en el pozo (disminución de la columna de agua) y además pérdidas por fricción, adicionalmente se tendrán pérdidas de calor hacia las inmediaciones del pozo.

La entalpía en la cabeza se puede obtener mediante:

$$h_B = h_A - q_p$$

Donde h_B es la entalpía específica del cabezal, h_A es la entalpía específica en el yacimiento, y q_p es la pérdida de calor por unidad de masa en el recorrido a través del pozo.

Conociendo la entalpía y la presión en el cabezal, se estará en condiciones de definir todo el estado termodinámico con las tablas de vapor.

- P_B = se conoce la presión del cabezal
- h_B = se calculó con la entalpía en el yacimiento y las pérdidas de calor
- $T_B, s_B, x_B, \rho_B @ h_B, P_B$ de tablas de vapor
- $\dot{m}_B = \dot{m}_A$

Una vez que el fluido geotérmico está en la superficie, se conduce a un arreglo de intercambiadores de calor, en los cuales cederá su energía al fluido de trabajo. Para realizar el balance en el arreglo, se deberá definir la temperatura a la que se desea rechazar el fluido geotérmico (estado D), el intercambio de calor se considera isobárico, por lo que se puede determinar todo el estado D conocida su presión y la temperatura de rechazo

- $P_D = P_B$ intercambio de calor isobárico
- T_D = se propone una temperatura de rechazo de salmuera
- $H_D, s_D, x_D, \rho_D @ T_D, P_D$ de tablas de vapor
- $\dot{m}_D = \dot{m}_B$

Para calcular el estado C se deberá calcular la cantidad de energía que cedió el fluido geotérmico para realizar la evaporación del fluido de trabajo:

$$h_C = h_B - (h_1 - h_5) \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_C}$$

- $P_C = P_B$ intercambio de calor isobárico
- h_C = se calcula con la energía de la evaporación
- $T_C, s_C, x_C, \rho_C @ h_C, P_C$ de tablas de vapor
- $\dot{m}_C = \dot{m}_B$

En el estado 1 se deberá definir la temperatura a la que se tendrá la evaporación, se conducirá a la turbina únicamente vapor seco:

- T_1 = Se define la temperatura de evaporación
- $X_1 = 100\%$ se usará vapor seco para la turbina
- $h_1, s_1, P_1, \rho_1 @ T_1, X_1$ de tablas de vapor

Con el balance de energía entre B - D y 4 - 1 se determina la masa:

$$\dot{m}_1 = \left(\frac{h_B - h_D}{h_1 - h_4} \right) \dot{m}_B$$

En el estado 2 habrá que hacer la diferencia entre ideal y real, nombrando al ideal como 2s y al real como 2r. El estado 2s se calcula asumiendo en la turbina un proceso a entropía constante y sin pérdidas, sin embargo en el estado 2r se considera una eficiencia de turbina, el estado 2s sirve para el cálculo del real:

- $P_{2s} = P_3$ intercambio de calor isobárico en el condensador
- $S_{2s} = S_1$ proceso isentrópico a través de la turbina
- $T_{2s}, h_{2s}, x_{2s}, \rho_{2s}$ @ S_{2s}, P_{2s} de tablas de vapor
- $\dot{m}_{2s} = \dot{m}_1$

Para el estado 2r se puede calcular la entalpía con la eficiencia de la turbina y conocido el salto entálpico ideal:

$$h_{2r} = (h_1 - h_{2s})\eta_{tur}$$

- $P_{2r} = P_3$ intercambio de calor isobárico en el condensador
- h_{2r} = Se calcula
- $T_{2r}, s_{2r}, x_{2r}, \rho_{2r}$ @ S_{2r}, P_{2r} de tablas de vapor
- $\dot{m}_{2r} = \dot{m}_1$

El estado 3 está limitado en la temperatura por el circuito de enfriamiento, y en la calidad por ser un condensador:

- T_3 = Se define según el sistema de enfriamiento
- $X = 0\%$ condensado
- P_3, s_3, h_3, ρ_3 @ T_3, X_3 de tablas de vapor
- $\dot{m}_3 = \dot{m}_1$

El estado 4 está definido por la presión en el evaporador y la entropía del condensado:

- $P_4 = P_1$ Presión del evaporador
- $s_4 = s_3$ bombeo isentrópico
- T_4, x_4, h_4, ρ_4 @ P_4, s_4 de tablas de vapor
- $\dot{m}_4 = \dot{m}_1$

Finalmente el estado 5 está limitado por la calidad (el fluido de trabajo debe estar a punto de saturación), y la presión (calentamiento isobárico).

- $P_5 = P_1$ Presión del evaporador
- $X_5 = 0\%$ a punto de saturación

- $T_5, P_5, h_5, \rho_5 @ P_{5,s5}$ de tablas de vapor
- $\dot{m}_5 = \dot{m}_1$

Así, han quedado definidos totalmente los estados termodinámicos del ciclo, ahora se da paso al cálculo de parámetros indicadores:

- Potencia Generada:

$$\dot{W} = (h_1 - h_{2r})\dot{m}_1 \cdot 10^{-3} \text{ [MW]}$$

BORRADOR

- Eficiencia térmica:

$$\eta_T = \left(\frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_4} \right)$$

- Eficiencia del intercambiador

$$\eta_{HX} = \left(\frac{h_1 - h_4}{h_1 - h_{@amb}} \right)$$

- Eficiencia global de recuperación

$$\eta_r = \eta_T \eta_{HX}$$

4.1.1. Optimización

A diferencia de un ciclo Rankine tradicional, en el que se suministra calor por medio de la combustión y por lo tanto el potencial de temperatura es considerable, en un ciclo binario el recurso geotérmico caliente está algunos grados centígrados por encima del fluido de trabajo, además el enfriamiento está limitado por algunos fenómenos como la incrustación, por lo que se vuelve muy importante la disposición de los intercambiadores de calor y el curso que debe llevar el agua geotérmica para maximizar su explotación.

Si por ejemplo, se quiere expulsar el fluido geotérmico lo más frío posible, con el objetivo de extraer la mayor cantidad posible de energía, se verá que la temperatura de evaporación que cumple el balance térmico será baja y por lo tanto la eficiencia térmica del ciclo también lo será, si por el contrario, se expulsa el fluido geotérmico a alta temperatura para lograr una mejor eficiencia térmica del ciclo, el calor que se le ha suministrado al sistema será pobre y por ende la generación.

Lo más adecuado para la buena implementación de un ciclo binario es lograr un compromiso entre eficiencia térmica del ciclo, y eficiencia del intercambiador de calor, en otras palabras, lo más importante para un ciclo binario es tener una buena eficiencia global de recuperación (potencia generada/ total calor aprovechable), en la figura 6 se muestra que existen unas condiciones en las que el ciclo puede ser operado óptimamente.

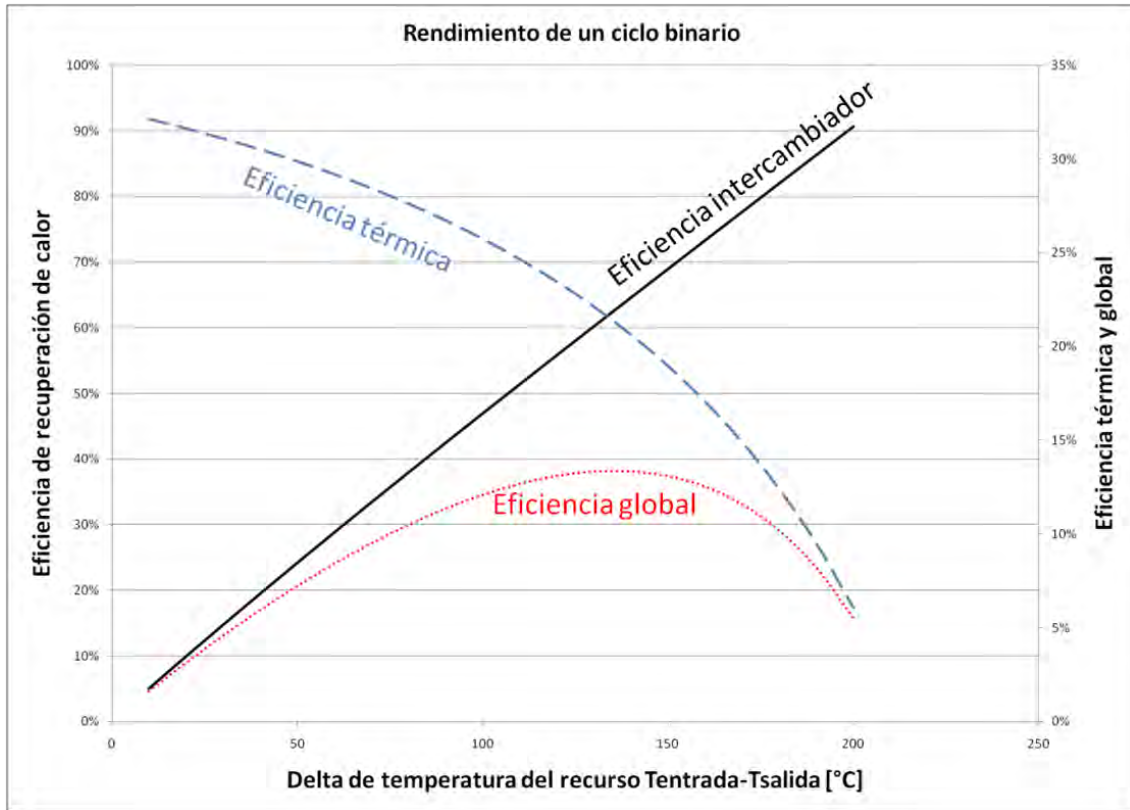


Figura 6 Rendimiento del ciclo binario

5. Posible Aplicación a un Caso Supercrítico.

El IDDP es un proyecto a largo plazo para mejorar la eficiencia y la economía de la energía geotérmica aprovechando los recursos profundos no convencionales. Implementado en el año 2000 por un consorcio de empresas islandesas la meta principal del IDDP es producir energía eléctrica de los fluidos geotérmicos supercríticos a profundidades de alrededor de 5000m, alcanzables por los métodos actuales de perforación. El plan es perforar y probar una serie de pozos en Islandia, en los sistemas hidrotermales de alta temperatura de Krafla, Hengill y Reykjanes. Se estimó que en esas regiones geotérmicas es posible obtener fluidos geotérmicos a una temperatura entre 450 y 600 [°C] a una profundidad que va de 3500 a 5000 [m].

El proyecto IDDP ha despertado el interés de la comunidad internacional pues además de su objetivo principal cumplirá varios objetivos alternativos como conocer acerca de la geología profunda, petrología y el estudio de recursos supercríticos para usos prácticos, ya que actualmente el estudio de estos se restringe a pequeñas pruebas de laboratorio o investigaciones de sistemas supercríticos fósiles en minas. Los países que han sido participes de la investigación del IDDP son: Estados Unidos, Japón, Nueva Zelandia, Italia, Alemania, Francia y en menor medida, Rusia, España, Noruega, Inglaterra, Luxemburgo, Grecia, Turquía y Portugal.

Actualmente se ha concluido la perforación del primer pozo de exploración profundo IDDP-1 en Krafla (el plan general contempla por lo menos dos etapas más, IDDP-2 en Reykjanes e IDDP-3 en Hengil).

Según las últimas noticias se están efectuando las pruebas de flujo desde Marzo de 2010, inicialmente el escape fue húmedo pero desde el 18 de Marzo el flujo ha sido de alrededor de 30 [kg/s] de vapor sobrecalentado (cerca de 3100 [kJ/kg] y 120 [°C] de sobrecalentamiento en el escape atmosférico) suficiente para generar 20[MW]; se han observado serios problemas de corrosión, erosión e incrustación en las tuberías de escape²⁶ lo que hace inadecuado el uso de este tipo de fluidos en ciclos directos de generación. La figura 7 muestra una imagen de las pruebas de flujo en el pozo IDDP-1 en marzo de 2010.

²⁶ <http://iddp.is/2010/07/336/#more-336>



Figura 7 Fotografía de las pruebas de flujo del IDDP-1, Marzo 2010.

En México se tiene potencial de encontrar geotermia supercrítica en Acoculco, ya que se han medido temperaturas de 310°C , pero podría perforarse más profundo si se iniciará un proyecto de investigación que buscara geotermia supercrítica en esa región.

En el campo geotérmico de Los Humeros se han medido temperaturas superiores a 400°C , lo que significa un incentivo importante para iniciar la búsqueda de un yacimiento supercrítico.

5.1. Escenario base

Se plantea el escenario a estudiar tomando como punto de partida las pruebas de IDDP, se evaluará el ciclo indirecto con los datos definidos en el escenario base (Anexo 7) y después se realizará la variación de algunos parámetros para observar la sensibilidad que tiene el sistema. Los datos de alimentación para la evaluación térmica se muestran en la tabla 2:

Tabla 3 Datos de alimentación para el escenario base.

Yacimiento			Equipos		
Temperatura de yacimiento	T_A [°C]	550	Eficiencia turbina	η_{tur} [%]	85
Presión de yacimiento	P_A [Bar]	260	Eficiencia bomba	η_{bom} [%]	70
Flujo másico en el pozo	\dot{m}_A [kg/s]	30	Acercamiento	ΔT [°C]	10
Superficie			Presión Condensador	P_2 [Bar _a]	0.1
Presión de cabezal	P_B [Bar]	195			

Rechazo de salmuera	T_D [°C]	90
---------------------	------------	----

5.2. Aplicación

A numerical simulation program with VBA was performed, programming the processes that occur in the cycle to determine each state starting from the defined input data for the base scenario; the summarized thermal balance is presented in figure 8.

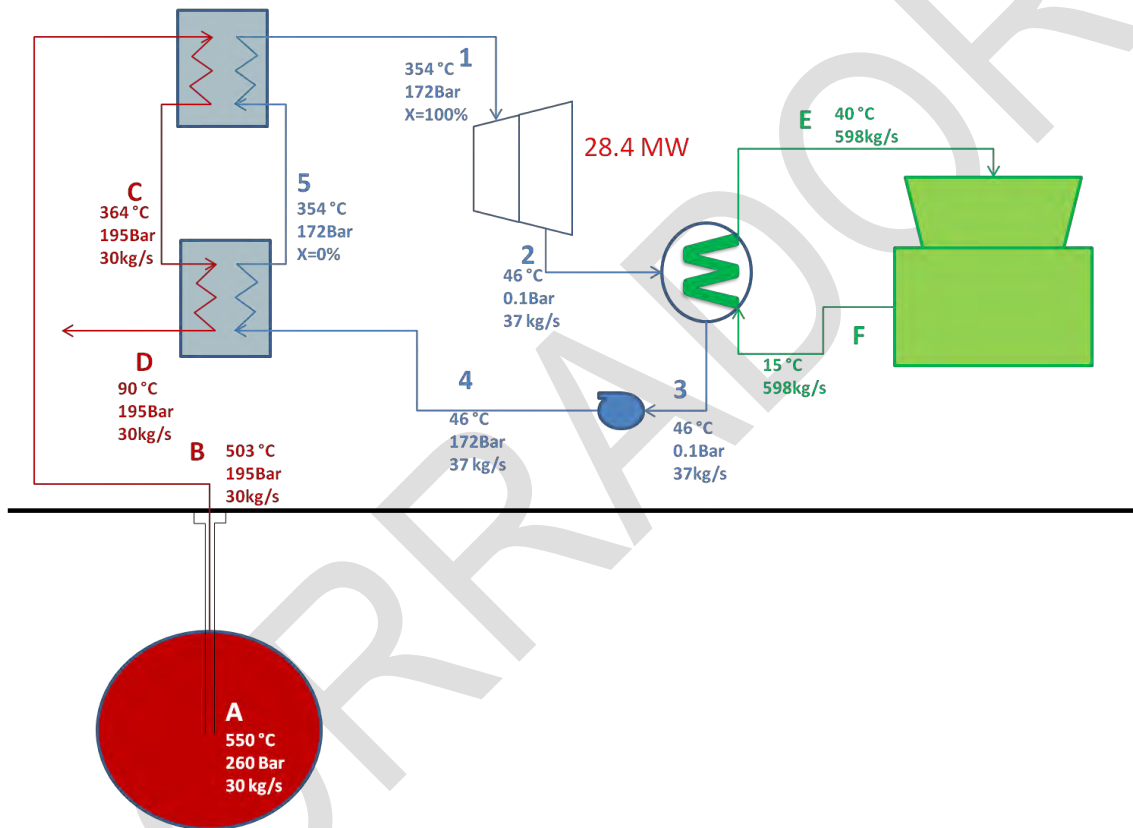


Figura 8 Balance térmico resumido del ciclo binario (escenario base).

The temperature-entropy diagram of the generation cycle is shown in figure 9.

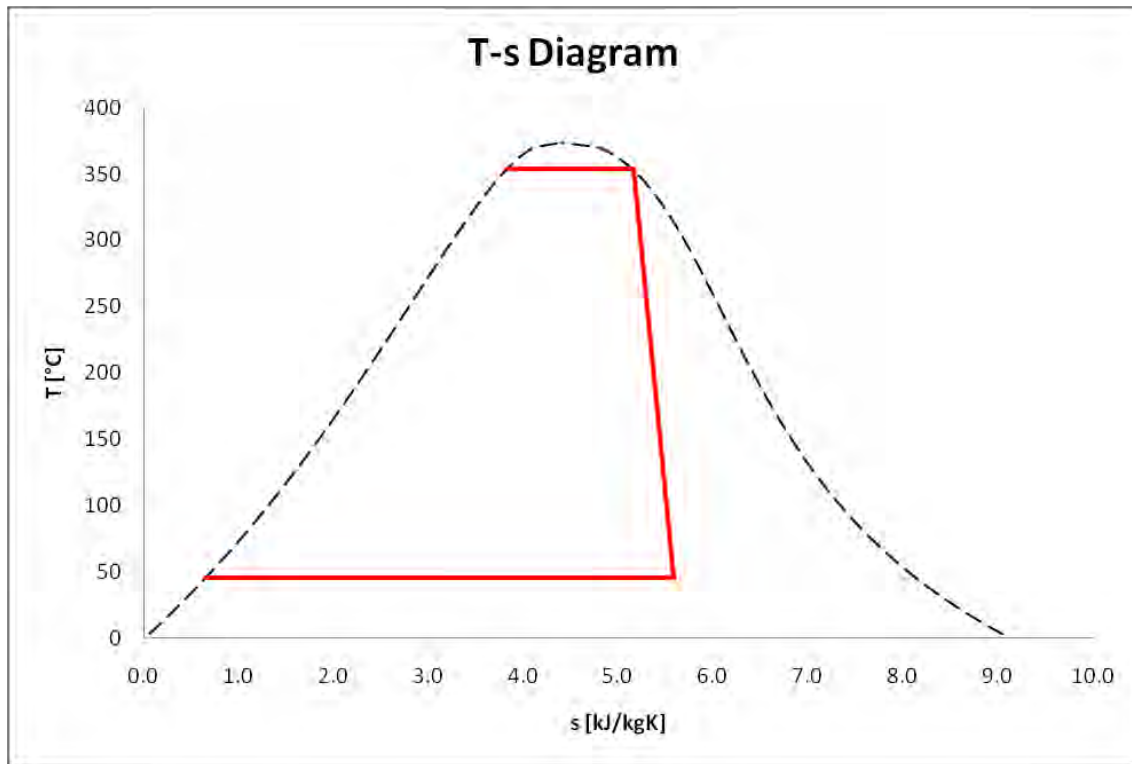


Figure 9 T-s diagram of the generation system

The requirements of heat exchangers will be:

Table 4 Basic Selection of Heat Exchangers.

Evaporador	
LMTD [°C]	52
U [W/m ² /K]	2500
Q [kW]	30823
A [m ²]	239
Precalentador	
LMTD [°C]	22
U [W/m ² /K]	1500
Q [kW]	55651
A [m ²]	1681
Condensador	
LMTD [°C]	15
U [W/m ² /K]	2000
Q [kW]	58063
A [m ²]	1907

En la figura 10 se muestra el diagrama de flujo de calor entre el enfriamiento de la salmuera geotérmica y el calentamiento del fluido de trabajo.

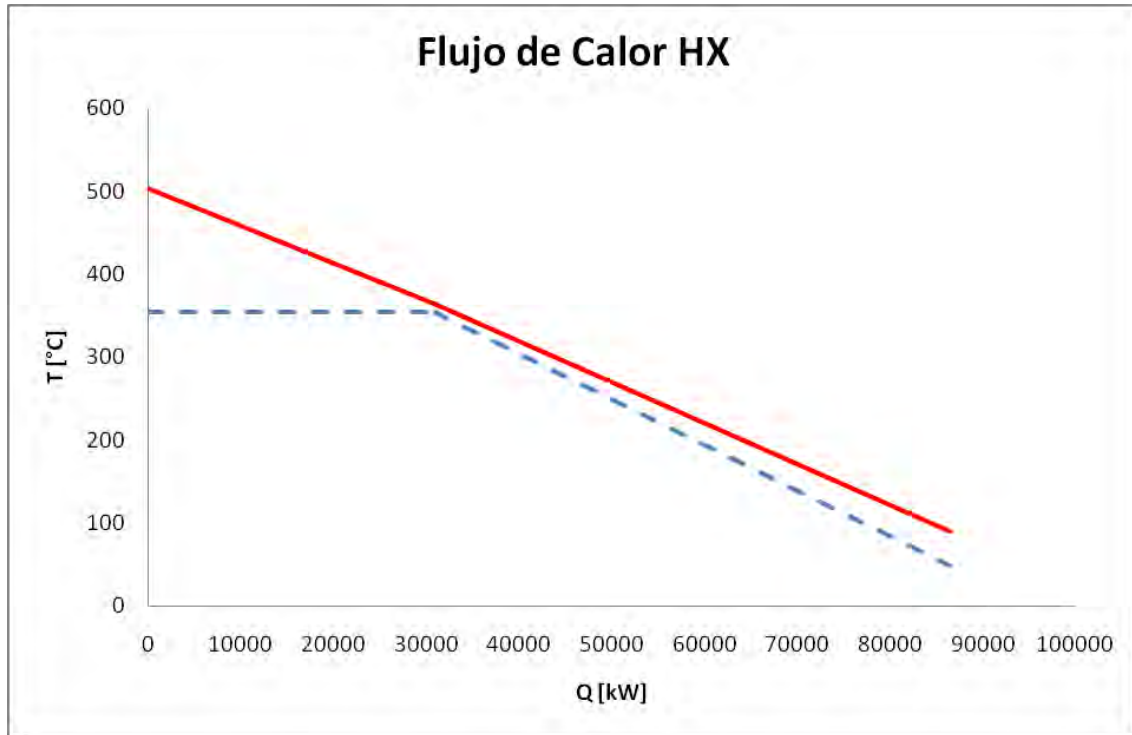


Figura 10 Diagrama de flujo de calor en los intercambiadores.

5.3. Sensibilidad

5.3.1. Temperatura del recurso

Es posible que al perforar mas de 3000m no sea alcanzado el objetivo de condiciones supercríticas en el yacimiento, se evaluó el impacto en la generación del sistema si el recurso estuviese en un rango de entre 250 y 550 °C (Anexo 8), la presión se consideró constante porque la columna de agua encima del yacimiento no se altera.

Tabla 5 Sensibilidad de Resultados Variando la Temperatura.

Temperatura	Potencia MW	η_r	A Evap [m2]	A Prec [m2]	A cond [m2]
550	28	32%	239	1681	1907
500	27	32%	298	1577	1790
450	24	32%	426	1447	1642
400	18	29%	607	616	1243
350	6	18%	163	107	685
300	4	14%	140	66	523
250	2	12%	123	41	392

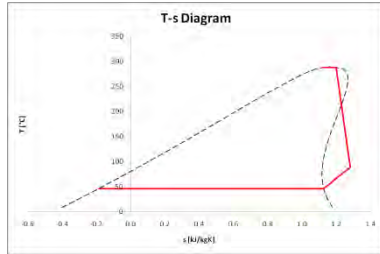
5.3.2. Fluido de trabajo

Como se mencionó en el capítulo 2, el fluido de trabajo impacta de manera importante en la eficiencia de un ciclo, además pueden encontrarse factores no deseables como la humedad en la turbina que ocasiona erosión en los álabes y toberas. Si se observa el diagrama T-s de la figura 9 se encontrará que el ciclo termodinámico del agua expande con un alto porcentaje de humedad, esto sin duda es un factor no deseable y puede eliminarse con purgas en las etapas internas de la turbina, modificando el ciclo de generación incorporando un sobrecalentamiento de vapor, o bien, cambiando el fluido de trabajo a uno del tipo seco o isentrópico cuya expansión en la turbina genere una menor fracción de humedad.

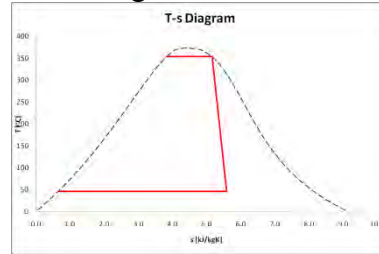
Se evaluó el sistema variando el fluido de trabajo (Anexo 9), los fluidos utilizados fueron los que mejor rendimiento presentaron en la evaluación del capítulo 2: benceno, agua, acetona, tolueno, etanol, R113, R141b, R21, ciclo-hexano y decano. Es importante hacer notar que el ciclo se consideró siempre por debajo del punto crítico.

The results were:

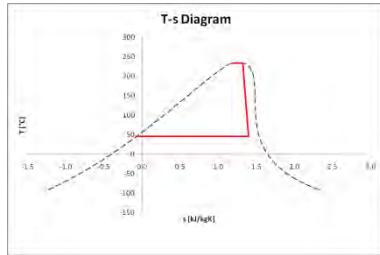
Benceno: 22 MW



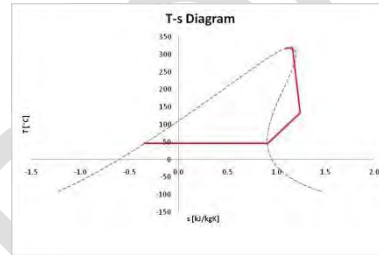
Agua: 28 MW



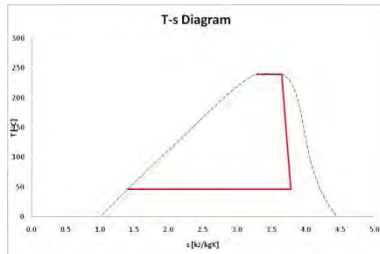
Acetona: 19 MW



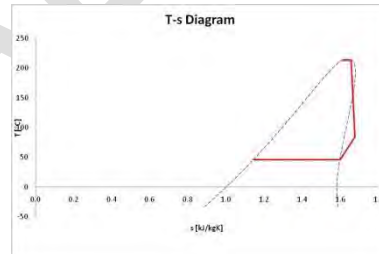
Tolueno: 22.5 MW



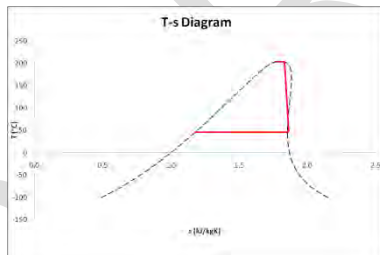
Etanol: 20.4



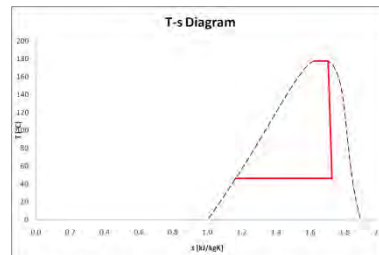
R113: 17.1 MW



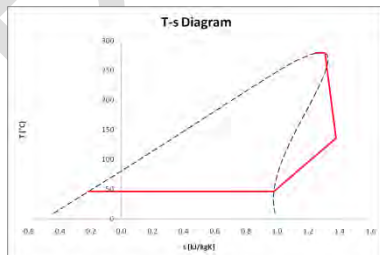
R141b: 17.2



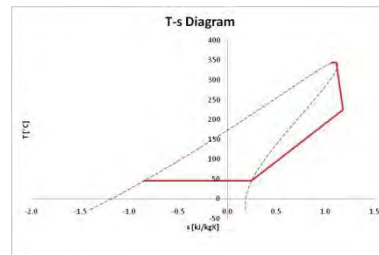
R21: 16 MW



Ciclo-hexano: 20 MW



Decano: 18.2



5.4. Discusión

La generación bruta fue de 28.4 MW eléctricos con los datos de alimentación del caso base, sin embargo, la potencia eléctrica entregable fácilmente pueden disminuir a 25 MW eléctricos al considerar los usos propios del sistema de generación.

Cabe resaltar que alcanzar las condiciones supercríticas puede incrementar hasta en un orden de magnitud la generación con geotermia con la misma cantidad de recurso (véase sensibilidad a la temperatura), el área de intercambio del evaporador y el condensador dependerá de la fracción de calor que se use para evaporación o calentamiento y el área del condensador se verá afectada en proporción a la eficiencia del ciclo.

Evidentemente el agua es quien presenta la mayor generación (mejor eficiencia) sin embargo sería posible usar fluidos como el benceno o el tolueno que presentan una buena eficiencia y al mismo tiempo eliminan la humedad en la turbina, además las presiones de admisión necesarias para alta temperatura son menores que la del agua, sin embargo el flujo se ve importantemente incrementado, además los importantes inconvenientes económicos y ambientales son evidentes.

6. Futuro tecnológico

Los ciclos binarios de alta temperatura, hasta ahora poco estudiados, se están transformando en una pieza clave para futuros desarrollos geotérmicos. El que más apoyo está recibiendo dentro de esta tecnología es el EGS²⁷ en el que el Departamento de Energía de los Estados Unidos enfoca sus esfuerzos a la investigación y desarrollo de los sitios candidatos, la creación, validación, sustentabilidad de yacimientos artificiales y la interconectividad de pozos.

En EGS se perfora a grandes profundidades hasta alcanzar altas temperaturas (del orden de 300°C) y luego con un choque térmico o altas presiones de agua, se fractura la roca. Para extraer el calor del subsuelo, se inyecta un fluido por un pozo y se recupera en otro a muy alta temperatura. El agua es el candidato natural para esta extracción de calor del subsuelo. Sin embargo, en Berkeley²⁸ ha propuesto el uso de CO₂ para esta tarea por ser abundante y no competir con el agua para otros usos. Si se usa CO₂, es evidente que será necesario transferir este calor a un fluido secundario para luego generar en ciclo binario. Esta operación se haría a alta temperatura para mejorar la eficiencia del ciclo. Es decir aquí aparece una aplicación tecnológica que podría ser de mucha utilidad.

Los sistemas EGS prometen energía continua y disponible asemejando una planta fósil, y a diferencia de las geotérmicas tradicionales pueden ser implementadas casi en cualquier parte del mundo dependiendo de las limitantes económicas de la perforación.

Los sistemas EGS actualmente se están desarrollando y probando en Francia, Australia, Japón, Alemania, Estados Unidos y Suiza; el mayor proyecto de este tipo en el mundo es una planta de demostración de 25 MW en la cuenca Cooper, Australia. En la tabla 3 se muestran los principales proyectos EGS en el mundo.

Tabla 6. Proyectos EGS en desarrollo

Proyecto	Tipo	Country	Capacidad (MW)	Tipo de Planta	Profundidad (km)	Desarrollador	Estatus
Soultz	Investigación y desarrollo	Francia	1.5	Binario	4.2	ENGINE	Operación
Desert Peak	Investigación y desarrollo	Estados Unidos	11–50	Binario		DOE, Ormat, GeothermEx	Desarrollo
Landau	Comercial	Alemania	3	Binario	3.3	?	Operación
Paralana (Phase 1)	Comercial	Australia	7–30	Binario	4.1	Petratherm	Perforación
Cooper Basin	Comercial	Australia	250–500	Kalina	4.3	Geodynamics	Perforación
The	Demostración	Estados	(desconocido)	Flash	3.5 – 3.8	AltaRock	Cancelado

²⁷<http://www1.eere.energy.gov/geothermal/>

²⁸ Op Cit 4

Geysers		Unidos				Energy, NCPA	(Enero 2010)
Bend, Oregon	Demostración	Estados Unidos	(desconocido)			AltaRock Energy	Permosos
Ogachi	Investigación y desarrollo	Japón	(desconocido)		1.0 – 1.1		Experimentos CO ₂
United Downs, Redruth	Comercial	Inglaterra	10 MW	Binario	4.5	Geothermal Engineering Ltd	Recaudando fondos
Eden Project	Comercial	Inglaterra	3 MW	Binario	3–4	EGS Energy Ltd.	Recaudando fondos

Otra aplicación es la producción de fluidos geotérmicos de muy alta temperatura como ya ha ocurrido en algunas perforaciones en Islandia dentro de su programa IDDP²⁹. Allí al perforar se tocó magma en forma de obsidiana fundida y el fluido geotérmico esperado, ya sea por producción artesiana o por inyección artificial de agua, resulta demasiado caliente. En este caso el fluido primario pasa por un intercambiador de calor donde entrega su energía a un fluido secundario para operar finalmente la turbina. Algo parecido ha ocurrido en la Isla Grande de Hawaii donde la lava está fundida a profundidades muy someras y se espera algún día extraerle calor mediante inyección de agua al yacimiento.

En la comunidad científica se mira cada vez con más interés³⁰ el aprovechamiento de los chorros submarinos que emanan de las ventilas que se forman en los dorsales oceánicos. Existen zonas con fluidos de más de 300°C donde se podría utilizar su calor directamente en un generador de ciclo binario submarino³¹. En este caso el análisis y diseño del ciclo de alta temperatura es indispensable.

Finalmente, una aplicación tecnológica que se estudia con particular interés es desplazar a las plantas geotérmicas que usan ciclo de flasheo por un ciclo binario de alta temperatura. Esto es concentrar todos los problemas típicos de los fluidos geotérmicos en el primer intercambiador de calor (corrosión, incrustación, sólidos suspendidos, abrasión, gases incondensables, etc.). Luego en el ciclo secundario, utilizar agua desmineralizada o algún fluido orgánico de propiedades adecuadas para el caso eliminando todos los aspectos típicos geotérmicos del secundario.

Se considera que estas tres aplicaciones que se avencinan en el mundo del desarrollo tecnológico de la geotermia como saltos tecnológicos, van a estar sustentadas en intercambiadores de calor de alta temperatura y su ciclo secundario correspondiente. El autor espera que esta tesis sirva para un mejor análisis de los casos que se tendrán que estudiar en el futuro.

²⁹ <http://iddp.is/>

³⁰ Op Cit 2

³¹ Hernández, I., 2007. Factibilidad Técnica de la Generación Eléctrica con Ventilal Hidrotermales

BORRADOR

Conclusiones

- Las características físicas de los fluidos geotérmicos hace de ellos un excelente medio de transporte de energía, sin embargo sus propiedades químicas como la acidez y su alto contenido de sólidos disueltos los hace totalmente inapropiados para su uso directo en turbinas.
- Los ciclos binarios de alta temperatura para geotermia pueden ser utilizados exitosamente en proyectos como el IDDP donde las características propias del fluido geotérmico inhabilitan la utilización directa del recurso en un ciclo común de generación.
- Existe una gran gamma de fluidos secundarios (98) a utilizar en el sistema de generación, todos ellos funcionales, pero se sugirió un ranking de prioridad en la selección del fluido, finalmente se sugiere el agua como fluido de trabajo por su buen desempeño en la evaluación técnica realizada, su inocuidad al ambiente e infiriendo su bajo costo de reposición.
- El uso de fluido geotérmico supercrítico en un ciclo binario de alta temperatura puede incrementar hasta en un orden de magnitud la potencia entregada de un sistema de generación, como se hizo evidente la potencia entregable es muy sensible a la temperatura del recurso.
- Los ciclos binarios de alta temperatura pueden ser utilizados exitosamente en proyectos de geotermia supercrítica, pero el uso de estos sistemas pudiese ser extendido a sistemas como el EGS, la geotermia submarina e incluso, si las ventajas técnicas y económicas lo permiten, a la geotermia convencional.

Referencias

- Armannsson H., 2010. IDDP The Chemistry of the Krafla Geothermal System in Relation to the IDDP Well. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010
- Arnorsson, S., Bjarnason, Ö., Cappetti, G., Elders, W., Fridleifsson, G., et al, 2002. IDDP SAGA Report N°2. Report of Workshop N° 1 of the Iceland Deep Drilling Project, Nesjavellir, Iceland, March 17-19, 2002
- Batton, B., 2000. Organic Rankine Cycle Engines for Solar Power. Presented at Solar 2000, Madison Wisconsin.
- Elders, W., Friðleifsson, G., 2009. Iceland Deep Drilling Project Finds Magma. Geothermal Resources Council Bulletin, Vol 38 N° 4., July/August, 2009.
- Elders, W., Friðleifsson, G., 2010. The Science Program of the Iceland Deep Drilling Project (IDDP): a Study of Supercritical Geothermal Resources. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- Fox, R., McDonald A., Pritchard P., 1998. Introduction to Fluid Mechanics, 6th ed. Wiley.
- Fridleifsson G., (2008), Iceland Deep Drilling Project, Drilling into a Supercritical Geothermal System. Workshop on International Partnership on Geothermal Technology 27-28 August 2008.
- Hernández, I., 2007. Factibilidad Técnica de la Generación Eléctrica con Ventiladores Hidrotermales, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Mayo 2007.
- Hiriart, G., Prol-Ledesma, R.M., Alcocer, S., and Espíndola, S., 2010. Submarine Geothermics: Hydrothermal Vents and Electricity Generation. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.
- Johnson, L., Walker, E., 2010. Ormat: Low-Temperature Geothermal Power Generation, Final Report for the period September 2008-February 2010. Rocky Mountain Oilfield Testing Center, US Department of energy.
- Liu, B., Chien, K., et al, 2004. Effect of Working Fluids on Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery. Elsevier Energy, Energy 29-2004, 1207-127,

- Marcuchilli, F., Thiolet, D., 2010. Optimizing Binary Cycles Thanks to Radial Inflow Turbines. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali Indonesia.
- NIST, 2007, REFPROP Standard Reference Database 23, Version 8.0
- Poling, B., Praustnizt, J., et al, 2001. The Properties of Gases and Liquids. 5th ed., New York, Mc Graw Hill.
- Pruess, K., Spycher, N., 2010. Enhanced Geothermal Systems (EGS) with CO₂ as heat transmission fluid – A scheme for combining recovery or renewable energy with geologic storage of CO₂. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-30 April 2010.
- Quoilin, S., Lemort, V., 2009. Tecnological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems. 5th European Conference Economic and Managment of Energy Industry, Algarve Portugal.
- Schegliaiev, 1978. Turbinas de Vapor. Mir Moscu, Moscú URSS, Traducción al Español Troyanovski B.
- U.S. Departament of Energy, (2004). Geothermal Technologies Program, Enhanced Geothermal Systems. Energy Efficiency and Renewable Energy, DOE/GO-102004-1958, August 2004.

Referencias Web

- Barber, Nichols, 2010. <http://www.barber-nichols.com/> (Ago-2010)
- <http://iddp.is/2010/07/336/#more-336> (Set -2010)
- <http://sfe.vemt.bme.hu/angol/supercritical.html> (Set-2010)
- <http://www1.eere.energy.gov/geothermal/> (Jul- 2010)
- IPCS <http://www.inchem.org/> (Ene – 2010)
- Lindstrom, R., 2008. Chemical Web Book, National Institute of Standards and Technology. <http://webbook.nist.gov/chemistry/> (Abr-2010)

Anexos

Anexo 1. Fluidos considerados

Index of pure fluids included in the REFPROP database				
Short Name	File Name	CAS number	Full Chemical Name	EOS Temperature and Pressure Limits
acetone	acetone.fld	67-64-1	propanone	178.5-550 K, 700 MPa
ammonia	ammonia.fld	7664-41-7	ammonia	195.495-700 K, 1000 MPa
argon	argon.fld	7440-37-1	argon	83.8058-2000 K, 1000 MPa
benzene	benzene.fld	71-43-2	benzene	278.7-635 K, 78 MPa
butane	butane.fld	106-97-8	n-butane	134.895-575 K, 69 MPa
butene	1butene.fld	106-98-9	1-butene	87.8-525 K, 70 MPa
carbon dioxide	co2.fld	124-38-9	carbon dioxide	216.592-2000 K, 800 MPa
carbon monoxide	co.fld	630-08-0	carbon monoxide	68.16-500 K, 100 MPa
carbonyl sulfide	cos.fld	463-58-1	carbon oxide sulfide	134.3-650 K, 50 MPa
cis-butene	c2butene.fld	590-18-1	cis-2-butene	134.3-525 K, 50 MPa
cyclohexane	cyclohex.fld	110-82-7	cyclohexane	279.47-700 K, 80 MPa
cyclopropane	cyclopro.fld	75-19-4	cyclopropane	273-473 K, 28 MPa
decane	decane.fld	124-18-5	decane	243.5-675 K, 800 MPa
deuterium	d2.fld	7782-39-0	deuterium	18.71-423 K, 320 MPa
dimethylether	dme.fld	115-10-6	ethylene oxide	131.65-525 K, 40 MPa
dodecane	c12.fld	112-40-3	dodecane	263.6-700 K, 700 MPa
ethane	ethane.fld	74-84-0	ethane	90.368-675 K, 900 MPa
ethanol	ethanol.fld	64-17-5	ethyl alcohol	250-650 K, 280 MPa
ethylene	ethylene.fld	74-85-1	ethene	103.986-450 K, 300 MPa
fluorine	fluorine.fld	7782-41-4	fluorine	53.4811-300 K, 20 MPa
heavy water	d2o.fld	7789-20-0	deuterium oxide	276.97-800 K, 100 MPa
helium	helium.fld	7440-59-7	helium-4	2.1768-1500 K, 100 MPa
heptane	heptane.fld	142-82-5	heptane	182.55-600 K, 100 MPa
hexane	hexane.fld	110-54-3	hexane	177.83-600 K, 100 MPa
hydrogen (normal)	hydrogen.fld	1333-74-0	hydrogen (normal)	13.957-1000 K, 2000 MPa
hydrogen sulfide	h2s.fld	04/06/7783	hydrogen sulfide	187.7-760 K, 170 MPa
isobutane	isobutan.fld	75-28-5	2-methylpropane	113.73-575 K, 35 MPa
isobutene	ibutene.fld	115-11-7	2-methyl-1-propene	132.4-550 K, 50 MPa
isohexane	ihexane.fld	107-83-5	2-methylpentane	119.6-550 K, 1000 MPa
isopentane	ipentane.fld	78-78-4	2-methylbutane	112.65-500 K, 1000 MPa
krypton	krypton.fld	7439-90-9	krypton	115.775-750 K, 200 MPa
methane	methane.fld	74-82-8	methane	90.6941-625 K, 1000 MPa
methanol	methanol.fld	67-56-1	methanol	175.61-620 K, 800 MPa
neon	neon.fld	09/01/7440	neon	24.556-700 K, 700 MPa
neopentane	neopentn.fld	463-82-1	2,2-dimethylpropane	256.6-550 K, 200 MPa
nitrogen	nitrogen.fld	7727-37-9	nitrogen	63.151-2000 K, 2200 MPa
nitrogen trifluoride	nf3.fld	7783-54-2	nitrogen trifluoride	85-500 K, 50 MPa
nitrous oxide	n2o.fld	10024-97-2	dinitrogen monoxide	182.33-525 K, 50 MPa
nonane	nonane.fld	111-84-2	nonane	219.7-600 K, 800 MPa
octane	octane.fld	111-65-9	octane	216.37-600 K, 100 MPa
oxygen	oxygen.fld	7782-44-7	oxygen	54.361-2000 K, 82 MPa
parahydrogen	parahyd.fld	1333-74-0p	parahydrogen	13.803-1000 K, 2000 MPa
pentane	pentane.fld	109-66-0	pentane	143.47-600 K, 100 MPa
perfluorobutane	c4f10.fld	355-25-9	decafluorobutane	189-500 K, 30 MPa

Anexos

perfluoropentane	c5f12.fld	678-26-2	dodecafluoropentane	200-500 K, 30 MPa
propane	propane.fld	74-98-6	propane	85.53-625 K, 1000 MPa
propylene	propylen.fld	115-07-1	propene	87.953-575 K, 1000 MPa
propyne	propyne.fld	74-99-7	propyne	273-474 K, 32 MPa
sulfur dioxide	so2.fld	05/09/7446	sulfur dioxide	197.7-525 K, 35 MPa
sulfur hexafluoride	sf6.fld	2551-62-4	sulfur hexafluoride	223.555-625 K, 150 MPa
toluene	toluene.fld	108-88-3	methylbenzene	178-700 K, 500 MPa
trans-butene	t2butene.fld	624-64-6	trans-2-butene	167.6-525 K, 50 MPa
trifluoriodomethane	cf3i.fld	2314-97-8	trifluoriodomethane	120-420 K, 20 MPa
water	water.fld	7732-18-5	water	273.16-2000 K, 1000 MPa
xenon	xenon.fld	7440-63-3	xenon	161.405-750 K, 700 MPa
R11	r11.fld	75-69-4	trichlorofluoromethane	162.68-625 K, 30 MPa
R12	r12.fld	75-71-8	dichlorodifluoromethane	116.099-525 K, 200 MPa
R13	r13.fld	75-72-9	chlorotrifluoromethane	92-403 K, 35 MPa
R14	r14.fld	75-73-0	tetrafluoromethane	120-623 K, 51 MPa
R21	r21.fld	75-43-4	dichlorofluoromethane	200-473 K, 138 MPa
R22	r22.fld	75-45-6	chlorodifluoromethane	115.73-550 K, 60 MPa
R23	r23.fld	75-46-7	trifluoromethane	118.02-475 K, 120 MPa
R32	r32.fld	75-10-5	difluoromethane	136.34-435 K, 70 MPa
R41	r41.fld	593-53-3	fluoromethane	129.82-425 K, 70 MPa
R113	r113.fld	76-13-1	1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoroethane	236.93-525 K, 200 MPa
R114	r114.fld	76-14-2	1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoroethane	273.15-507 K, 21 MPa
R115	r115.fld	76-15-3	chloropentafluoroethane	173.75-550 K, 60 MPa
R116	r116.fld	76-16-4	hexafluoroethane	173.1-425 K, 50 MPa
R123	r123.fld	306-83-2	2,2-dichloro-1,1,1-trifluoroethane	166-600 K, 40 MPa
R124	r124.fld	2837-89-0	1-chloro-1,2,2,2-tetrafluoroethane	120-470 K, 40 MPa
R125	r125.fld	354-33-6	pentafluoroethane	172.52-500 K, 60 MPa
R134a	r134a.fld	811-97-2	1,1,1,2-tetrafluoroethane	169.85-455 K, 70 MPa
R141b	r141b.fld	1717-00-6	1,1-dichloro-1-fluoroethane	169.68-500 K, 400 MPa
R142b	r142b.fld	75-68-3	1-chloro-1,1-difluoroethane	142.72-470 K, 60 MPa
R143a	r143a.fld	420-46-2	1,1,1-trifluoroethane	161.34-650 K, 100 MPa
R152a	r152a.fld	75-37-6	1,1-difluoroethane	154.56-500 K, 60 MPa
R218	r218.fld	76-19-7	octafluoropropane	125.45-440 K, 20 MPa
R227ea	r227ea.fld	431-89-0	1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane	146.35-475 K, 60 MPa
R236ea	r236ea.fld	431-63-0	1,1,1,2,3,3-hexafluoropropane	242-500 K, 60 MPa
R236fa	r236fa.fld	690-39-1	1,1,1,3,3,3-hexafluoropropane	179.52-500 K, 40 MPa
R245ca	r245ca.fld	679-86-7	1,1,2,2,3-pentafluoropropane	200-500 K, 60 MPa
R245fa	r245fa.fld	460-73-1	1,1,1,3,3-pentafluoropropane	171.05-440 K, 200 MPa
R365mfc	r365mfc.fld	406-58-6	1,1,1,3,3-pentafluorobutane	239-500 K, 35 MPa
RC318	rc318.fld	115-25-3	octafluorocyclobutane	233.35-623 K, 60 MPa

Index of mixtures included in the REFPROP database

ASHRAE Designation	Components	Composition (mass percentages)	Composition (mole fractions)
air	N2/Ar/O2	75.57/1.27/23.16	0.78120/0.00920/0.20960
R401A	R22/R152a/R124	53/13/34	0.57885/0.18587/0.23527
R401B	R22/R152a/R124	61/11/28	0.65492/0.15461/0.19047
R401C	R22/R152a/R124	33/15/52	0.38559/0.22945/0.38496
R402A	R125/Propane/R22	60/2/38	0.50766/0.04606/0.44628
R402B	R125/Propane/R22	38/2/60	0.29986/0.04296/0.65719
R403A	Propane/R22/R218	5/75/20	0.10430/0.79785/0.09785

Anexos

R403B	Propane/R22/R218	5/56/39	0.11708/0.66873/0.21418
R404A	R125/R134a/R143a	44/4/52	0.35782/0.03826/0.60392
R405A	R22/R152a/R142b/RC318	45/7/5.5/42.5	0.58240/0.11860/0.06125/0.23776
R406A	R22/Isobutane/R142b	55/4/41	0.57156/0.06184/0.36660
R407A	R32/R125/R134a	20/40/40	0.34642/0.30032/0.35326
R407B	R32/R125/R134a	10/70/20	0.19787/0.60036/0.20177
R407C	R32/R125/R134a	23/25/52	0.38111/0.17956/0.43933
R407D	R32/R125/R134a	15/15/70	0.26227/0.11368/0.62405
R407E	R32/R125/R134a	25/15/60	0.40261/0.10471/0.49268
R408A	R125/R143a/R22	7/46/47	0.05075/0.47628/0.47297
R409A	R22/R124/R142b	60/25/15	0.67609/0.17848/0.14543
R409B	R22/R124/R142b	65/25/10	0.72671/0.17709/0.09620
R410A	R32/R125	50/50	0.69761/0.30239
R410B	R32/R125	45/55	0.65369/0.34631
R411A	Propylene/R22/R152a	1.5/87.5/11	0.02936/0.83347/0.13717
R411B	Propylene/R22/R152a	3/94/3	0.05922/0.90305/0.03773
R412A	R22/R218/R142b	70/5/25	0.74619/0.02451/0.22930
R413A	R218/R134a/Isobutane	9/88/3	0.04976/0.89658/0.05366
R414A	R22/R124/Isobutane/R142b	51/28.5/4/16.5	0.57172/0.20242/0.06671/0.15915
R414B	R22/R124/Isobutane/R142b	50/39/1.5/9.5	0.58744/0.29031/0.02622/0.09603
R415A	R22/R152a	82/18	0.77678/0.22322
R415B	R22/R152a	25/75	0.20295/0.79705
R416A	R134a/R124/Butane	59/39.5/1.5	0.64718/0.32393/0.02888
R417A	R125/R134a/Butane	46.6/50/3.4	0.41446/0.52310/0.06244
R418A	Propane/R22/R152a	1.5/96/2.5	0.02878/0.93920/0.03202
R419A	R125/R134a/DME	77/19/4	0.70146/0.20360/0.09494
R420A	R134a/R142b	88/12	0.87839/0.12161
R421A	R125/R134a	58/42	0.54001/0.45999
R421B	R125/R134a	85/15	0.82810/0.17190
R422A	R125/R134a/Isobutane	85.1/11.5/3.4	0.80550/0.12804/0.06646
R422B	R125/R134a/Isobutane	55/42/3	0.49729/0.44670/0.05601
R422C	R125/R134a/Isobutane	82/15/3	0.77476/0.16671/0.05853
R422D	R125/R134a/Isobutane	65.1/31.5/3.4	0.59629/0.33940/0.06431
R423A	R134a/R227ea	52.5/47.5	0.64812/0.35188
R424A	R125/R134a/Isobutane/Butane/ Isopentane	50.5/47.9/1/0.6	0.45615/0.49939/0.01679/0.01865/ 0.00902
R425A	R32/R134a/R227ea	18.5/69.5/12	0.32113/0.61513/0.06373
R426A	R125/R134a/Butane/Isopentane	5.1/93/1.3/0.6	0.04315/0.92568/0.02272/0.00845
R427A	R32/R125/R143a/R134a	15/25/10/50	0.26078/0.18839/0.10762/0.44321
R428A	R125/R143a/Propane/Isobutane	77.5/20/0.6/1.9	0.69433/0.25589/0.01463/0.03515
R500	R12/R152a	73.8/26.2	0.60610/0.39390
R501	R22/R12	75/25	0.80751/0.19249
R502	R22/R115	48.8/51.2	0.62999/0.37001
R503	R23/R13	40.1/59.9	0.49970/0.50030
R504	R32/R115	48.2/51.8	0.73424/0.26576
R507A	R125/R143a	50/50	0.41184/0.58816
R508A	R23/R116	39/61	0.55758/0.44242
R508B	R23/R116	46/54	0.62675/0.37325
R509A	R22/R218	44/56	0.63079/0.36921

Anexo 2. Eficiencia

Efficiency																			
T _c [°C]	20						30						40						Average
T _H [°C]	100	150	200	250	300	350	100	150	200	250	300	350	100	150	200	250	300	350	
Carnot	21%	31%	38%	44%	49%	53%	19%	28%	36%	42%	47%	51%	16%	26%	34%	40%	45%	50%	37%
acetone	19%	25%	29%	31%	33%	34%	17%	23%	27%	30%	31%	32%	14%	21%	26%	28%	30%	30%	27%
ammonia	18%	22%	24%	26%	28%	29%	16%	20%	22%	24%	26%	27%	14%	19%	21%	22%	24%	25%	23%
argon																			
benzene	19%	25%	30%	32%	34%	35%	17%	23%	28%	31%	33%	33%	14%	22%	26%	29%	31%	31%	27%
butane	17%	21%					15%	19%					13%	18%					17%
butene																			
carbon dioxide	5%	5%	5%	5%	5%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%							3%
carbon monoxide																			
carbonyl sulfide	17%	20%	21%	22%	23%	23%	15%	18%	19%	20%	21%	21%	13%	16%	17%	18%	18%	18%	19%
cis-butene.mix																			
cyclohexane	18%	24%	28%	30%	31%	30%	16%	22%	26%	28%	29%	28%	14%	21%	24%	27%	27%	27%	25%
cyclopropane	17%	21%	22%	22%	22%	21%	15%	19%	20%	20%	19%	19%	13%	17%	18%	18%	17%	17%	19%
decane	17%	22%	25%	27%	27%	28%	15%	21%	24%	25%	26%	26%	13%	19%	22%	24%	25%	25%	23%
deuterium																			
dimethylether.mix																			
dodecane																			
ethane																			
ethanol	19%	26%	30%	32%	34%	36%	17%	24%	28%	31%	33%	34%	15%	22%	27%	29%	31%	33%	28%
ethylene																			
fluorine																			
helium																			
heptane	17%	22%	25%	27%	27%	26%	15%	21%	24%	25%	25%	24%	13%	19%	22%	24%	24%	23%	22%
hexane	17%	22%	25%				15%	21%	24%				13%	19%	22%				20%
hydrogen (normal)																			
hydrogen sulfide	16%	19%	21%	22%	23%	24%	14%	17%	19%	20%	21%	22%	12%	15%	17%	18%	18%	19%	19%
isobutane	17%	20%	20%	19%	19%	18%	15%	18%	18%	18%	17%	16%	13%	17%	17%	16%	15%	14%	17%
isobutene																			
isohexane	17%	22%	25%	25%	24%	23%	15%	20%	23%	24%	23%	22%	13%	19%	22%	22%	21%	20%	21%
isopentane	17%	22%	24%	23%	22%	22%	15%	20%	22%	22%	21%	20%	13%	19%	21%	20%	19%	19%	20%
krypton																			
methane																			
methanol	20%	27%	31%	33%	36%	37%	17%	25%	29%	32%	34%	36%	15%	23%	28%	30%	33%	34%	29%
neon																			
neopentane	16%	21%	21%	20%	19%	18%	15%	19%	19%	18%	18%	17%	13%	17%	18%	17%	16%	15%	18%
nitrogen																			
nitrogen trifluoride																			

Anexos

nitrous oxide	6%	7%	7%	7%	7%	7%	3%	3%	3%	3%	3%	3%							5%
nonane	17%	22%	25%	27%	28%	27%	15%	21%	24%	25%	26%	26%	13%	19%	22%	24%	25%	24%	23%
octane	17%	22%	25%	27%	28%	27%	15%	21%	24%	25%	26%	25%	13%	19%	22%	24%	25%	24%	23%
oxygen																			
parahydrogen																			
pentane	17%	22%	25%	24%	24%	23%	15%	21%	23%	23%	22%	21%	13%	19%	22%	21%	21%	20%	21%
perfluorobutane																			
perfluoropentane																			
propane	15%	17%	17%	16%	16%	15%	13%	15%	15%	14%	14%	13%	12%	13%	13%	12%	12%	11%	14%
propylene	15%	17%	17%	16%	16%	16%	13%	15%	15%	14%	14%	13%	11%	12%	12%	12%	12%	11%	14%
propyne	18%	22%	23%	24%	24%	24%	16%	20%	21%	22%	21%	21%	14%	18%	19%	19%	19%	19%	20%
sulfur dioxide																			
sulfur hexafluoride	7%	6%	6%	6%	6%	5%	4%	4%	4%	4%	3%	3%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	4%
toluene	19%	25%	29%	32%	34%	34%	17%	23%	28%	31%	32%	33%	14%	21%	26%	29%	31%	31%	27%
trans-butene																			
trifluoriodomethane																			
water	20%	28%	34%	38%	40%	42%	18%	26%	32%	36%	39%	40%	15%	24%	30%	35%	38%	39%	32%
xenon																			
R11	18%	24%					16%	22%					14%	21%					19%
R12	16%	19%	20%	20%	20%	19%	14%	17%	18%	18%	18%	17%	13%	15%	16%	16%	16%	15%	17%
R13	3%	3%	3%	3%	3%														3%
R14																			
R21	18%	24%	27%	29%	30%	30%	16%	22%	25%	27%	28%	28%	14%	20%	23%	25%	26%	26%	24%
R22	16%	18%	19%	19%	19%	19%	14%	16%	17%	17%	17%	17%	12%	14%	14%	14%	14%	14%	16%
R23	3%	3%	2%	2%	2%	2%													2%
R32	14%	16%	17%	18%	18%	18%	12%	14%	15%	15%	15%	15%	10%	11%	12%	12%	12%	12%	14%
R41	8%	9%	9%	9%	9%	9%	5%	6%	6%	6%	6%	5%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	5%
R113	18%	23%	26%	27%	27%	26%	16%	21%	24%	25%	25%	25%	14%	20%	23%	24%	24%	23%	23%
R114	17%	20%	21%	20%	20%	19%	15%	19%	19%	19%	18%	18%	13%	17%	17%	17%	17%	16%	18%
R115	13%	13%	12%	12%	11%	11%	11%	10%	10%	9%	9%	9%	9%	9%	8%	8%	7%	7%	10%
R116																			
R123	18%	23%	25%	26%	26%	25%	16%	21%	24%	24%	24%	24%	14%	20%	22%	23%	22%	22%	22%
R124	16%	19%	19%	19%	18%	18%	15%	17%	17%	17%	16%	16%	13%	16%	16%	15%	15%	14%	16%
R125	11%	11%	11%	10%	10%	10%	9%	9%	9%	8%	8%	7%	7%	7%	6%	6%	6%	5%	8%
R134a	15%	17%	18%	17%	17%	16%	13%	16%	15%	15%	15%	14%	11%	14%	13%	13%	13%	12%	15%
R141b	18%	24%	27%	28%	29%	29%	16%	22%	25%	27%	27%	27%	14%	20%	24%	25%	25%	25%	24%
R142b	17%						15%						13%						15%
R143a	13%	13%	13%	13%	12%	12%	11%	11%	11%	10%	10%	10%	8%	9%	8%	8%	8%	7%	10%
R152a	17%	20%	21%	21%	20%	20%	15%	18%	19%	19%	18%	18%	13%	16%	16%	16%	16%	16%	18%
R218	11%	10%	9%	9%	8%	8%	9%	8%	8%	7%	7%	6%	7%	6%	6%	5%	5%	5%	7%
R227ea	15%						13%						11%						13%
R236ea	16%	20%	20%	19%	19%	18%	15%	18%	18%	18%	17%	17%	13%	17%	17%	16%	16%	15%	17%
R236fa	16%	18%	18%	17%	17%	16%	14%	17%	16%	16%	15%	14%	12%	15%	15%	14%	14%	13%	15%
R245ca	17%	22%					15%	20%					13%	19%					18%
R245fa	17%	21%					15%	19%					13%	18%					17%

Anexos

R365mfc	17%	22%	23%	23%	22%	22%	15%	20%	22%	22%	21%	20%	13%	18%	21%	20%	19%	19%	20%
RC318	15%	16%	15%	14%	14%	13%	13%	14%	13%	13%	12%	12%	12%	13%	12%	11%	11%	10%	13%
air																			
R401A.mix	15%						14%						12%						14%
R401B.mix	15%	18%	19%	19%	19%	19%	14%	16%	17%	17%	17%	16%	12%	14%	15%	15%	15%	14%	16%
R401C.mix	16%	18%	19%	19%	19%	18%	14%	17%	17%	17%	17%	16%	12%	15%	15%	15%	15%	14%	16%
R402A.mix	13%	14%	14%	13%	13%	13%	11%	11%	11%	11%	11%	10%	9%	9%	9%	9%	8%	8%	11%
R402B.mix	14%	15%	15%	15%	15%	15%	12%	13%	13%	13%	13%	12%	10%	11%	11%	11%	10%	10%	13%
R403A.mix	14%	16%	16%	16%	16%	15%	12%	14%	14%	14%	13%	13%	11%	12%	12%	11%	11%	11%	13%
R403B.mix	14%	14%	14%	14%	13%	13%	12%	12%	12%	12%	11%	11%	10%	10%	10%	9%	9%	9%	12%
R404A.mix	13%	13%	12%	12%	12%	11%	10%	10%	10%	10%	9%	9%	8%	8%	8%	8%	7%	7%	10%
R405A.mix	15%	17%	17%	17%	17%	16%	13%	15%	15%	15%	15%	14%	11%	13%	13%	13%	13%	13%	15%
R406A.mix	15%	19%	20%	20%	20%	19%	13%	17%	18%	18%	18%	17%	12%	15%	16%	16%	16%	15%	17%
R407A.mix	13%	15%	15%	14%	14%	14%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	10%	10%	10%	10%	10%	9%	12%
R407B.mix	13%	13%	13%	13%	12%	12%	11%	11%	11%	10%	10%	10%	8%	9%	8%	8%	8%	7%	10%
R407C.mix	14%	15%	15%	15%	15%	15%	12%	13%	13%	13%	13%	12%	10%	11%	11%	11%	10%	10%	13%
R407D.mix	14%	16%	16%	16%	15%	15%	12%	14%	14%	14%	13%	13%	10%	12%	12%	11%	11%	11%	13%
R407E.mix	14%	16%	16%	16%	16%	15%	12%	14%	14%	14%	13%	13%	10%	11%	11%	11%	11%	11%	13%
R408A.mix	14%	15%	16%	15%	15%	15%	12%	13%	13%	13%	13%	13%	10%	11%	11%	11%	10%	10%	13%
R409A.mix	15%	18%	19%	19%	19%	19%	13%	16%	17%	17%	17%	17%	12%	14%	15%	15%	15%	14%	16%
R409B.mix	15%	18%	19%	19%	19%	19%	13%	16%	17%	17%	17%	16%	12%	14%	15%	15%	15%	14%	16%
R410A.mix	13%	14%	14%	14%	14%	14%	11%	12%	12%	12%	12%	11%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	12%
R410B.mix																			
R411A.mix	15%	18%	19%	19%	19%	19%	13%	16%	17%	17%	17%	17%	12%	14%	15%	15%	15%	14%	16%
R411B.mix	16%	18%	19%	19%	19%	19%	14%	16%	16%	17%	16%	16%	12%	14%	14%	14%	14%	14%	16%
R412A.mix	15%	18%	19%	19%	19%	19%	13%	16%	17%	17%	17%	17%	11%	14%	15%	15%	15%	14%	16%
R413A.mix	14%	16%	16%	16%	15%	15%	13%	14%	14%	14%	13%	13%	11%	12%	12%	12%	11%	11%	13%
R414A.mix	15%	18%	19%	19%	19%	18%	13%	16%	17%	17%	17%	16%	12%	15%	15%	15%	15%	14%	16%
R414B.mix	15%	18%	19%	19%	19%	18%	13%	16%	17%	17%	16%	16%	12%	14%	15%	15%	14%	14%	16%
R415A.mix	15%	18%	19%	20%	20%	19%	14%	16%	17%	17%	17%	17%	12%	14%	15%	15%	15%	15%	17%
R415B.mix	16%	19%	20%	21%	20%	20%	14%	18%	18%	18%	18%	18%	13%	16%	16%	16%	16%	16%	17%
R416A.mix	15%	18%	18%	17%	17%	16%	14%	16%	16%	15%	15%	14%	12%	14%	14%	13%	13%	13%	15%
R417A.mix	14%	15%	14%	14%	14%	13%	12%	13%	12%	12%	12%	11%	10%	11%	10%	10%	10%	9%	12%
R418A.mix	15%	18%	19%	19%	19%	19%	14%	16%	16%	17%	17%	16%	12%	14%	14%	14%	14%	14%	16%
R419A.mix	13%	14%	13%	13%	12%	12%	11%	11%	11%	11%	10%	10%	9%	9%	9%	9%	8%	8%	11%
R420A.mix	15%	18%	18%	18%	17%	17%	14%	16%	16%	16%	15%	15%	12%	14%	14%	14%	13%	13%	15%
R421A.mix																			
R421B.mix	12%	12%	12%	11%	11%	11%	10%	10%	10%	9%	9%	9%	8%	8%	8%	7%	7%	7%	9%
R422A.mix	12%	12%	12%	11%	11%	10%	10%	10%	10%	9%	9%	8%	8%	8%	7%	7%	7%	6%	9%
R422B.mix	13%	14%	14%	13%	13%	12%	12%	12%	12%	11%	11%	10%	10%	10%	10%	9%	9%	8%	11%
R422C.mix	12%	12%	12%	11%	11%	11%	10%	10%	10%	9%	9%	9%	8%	8%	8%	7%	7%	7%	9%
R422D.mix	13%	13%	13%	13%	12%	12%	11%	11%	11%	11%	10%	10%	9%	9%	9%	8%	8%	8%	11%
R423A.mix	15%	16%	16%	15%	15%	14%	13%	14%	14%	13%	13%	12%	11%	12%	12%	12%	11%	11%	13%
R424A.mix	14%	14%	14%	14%	13%	13%	12%	12%	12%	12%	11%	11%	10%	10%	10%	10%	9%	9%	12%
R425A.mix	14%	16%	16%	16%	16%	16%	12%	14%	14%	14%	14%	13%	11%	12%	12%	12%	12%	11%	14%

Anexos

R426A.mix																				
R427A.mix	14%	15%	15%	15%	14%	14%	12%	13%	13%	13%	12%	12%	10%	11%	11%	10%	10%	10%	12%	
R428A.mix																				
R500.mix	15%	18%	19%	19%	18%	18%	14%	16%	16%	16%	16%	16%	12%	14%	14%	14%	14%	14%	16%	
R501.mix	16%	18%	19%	19%	19%	19%	14%	16%	16%	16%	16%	16%	12%	14%	14%	14%	14%	14%	16%	
R502.mix	14%	15%	15%	14%	14%	14%	12%	13%	12%	12%	12%	12%	10%	10%	10%	10%	10%	9%	12%	
R503.mix																				
R504.mix	12%	12%	12%	12%	12%	12%	9%	10%	10%	9%	9%	9%	7%	7%	7%	7%	6%	6%	9%	
R507A.mix	12%	12%	12%	12%	11%	11%	10%	10%	10%	10%	9%	9%	8%	8%	8%	7%	7%	7%	10%	
R508A.mix																		17%	17%	
R508B.mix																				
R509A.mix	12%	12%	11%	11%	11%	10%	10%	9%	9%	9%	8%	8%	7%	7%	7%	7%	6%	6%	9%	

Anexo 3. Humedad

Wetness							
Fluid	ds/dT _H	Type	Score	Fluid	ds/dT _H	Type	Score
acetone	-1.1	Wet	0.94	R125	-0.7	Wet	0.96
ammonia	-18.3	Wet	0.00	R134a	-1.0	Wet	0.95
argon				R141b	-0.2	Isentropic	0.99
benzene	0.2	Isentropic	0.99	R142b	-0.7	Wet	0.96
butane	-0.2	Isentropic	0.99	R143a	-1.7	Wet	0.91
butene				R152a	-2.4	Wet	0.87
carbon dioxide				R218	0.7	Dry	0.96
carbon monoxide				R227ea	0.6	Dry	0.97
carbonyl sulfide	-4.3	Wet	0.77	R236ea	0.6	Dry	0.97
cis-butene.mix				R236fa	0.5	Dry	0.97
cyclohexane	1.3	Dry	0.93	R245ca	0.5	Dry	0.97
cyclopropane				R245fa	0.3	Isentropic	0.98
decane	3.5	Dry	0.81	R365mfc	1.0	Dry	0.94
deuterium				RC318	0.9	Dry	0.95
dimethylether.mix				air			
dodecane				R401A.mix	-1.5	Wet	0.92
ethane	-9.4	Wet	0.48	R401B.mix	-1.6	Wet	0.91
ethanol	-3.4	Wet	0.81	R401C.mix	-1.1	Wet	0.94
ethylene				R402A.mix	-1.4	Wet	0.92
fluorine				R402B.mix	-1.8	Wet	0.90
helium				R403A.mix	-1.8	Wet	0.90
heptane	2.7	Dry	0.85	R403B.mix	-1.2	Wet	0.93
hexane	2.1	Dry	0.89	R404A.mix	-1.2	Wet	0.94
hydrogen (normal)				R405A.mix	-0.7	Wet	0.96
hydrogen sulfide	-8.7	Wet	0.52	R406A.mix	-1.4	Wet	0.92
isobutane	-0.4	Isentropic	0.98	R407A.mix	-1.6	Wet	0.91
isobutene				R407B.mix	-1.1	Wet	0.94
isohexane	2.1	Dry	0.88	R407C.mix	-1.8	Wet	0.90
isopentane	1.1	Dry	0.94	R407D.mix	-1.5	Wet	0.92
krypton				R407E.mix	-1.9	Wet	0.89
methane				R408A.mix	-2.0	Wet	0.89
methanol	-8.3	Wet	0.55	R409A.mix	-1.4	Wet	0.92
neon				R409B.mix	-1.5	Wet	0.92
neopentane	1.1	Dry	0.94	R410A.mix	-3.1	Wet	0.83
nitrogen				R410B.mix	-2.9	Wet	0.84
nitrogen trifluoride				R411A.mix	-2.3	Wet	0.87
nitrous oxide	-7.8	Wet	0.57	R411B.mix	-2.4	Wet	0.87
nonane	3.3	Dry	0.82	R412A.mix	-1.6	Wet	0.91
octane	3.1	Dry	0.83	R413A.mix	-0.8	Wet	0.96
oxygen				R414A.mix	-1.2	Wet	0.93
parahydrogen				R414B.mix	-1.2	Wet	0.94
pentane	1.2	Dry	0.93	R415A.mix	-2.3	Wet	0.88
perfluorobutane				R415B.mix	-2.3	Wet	0.87
perfluoropentane				R416A.mix	-0.6	Wet	0.97
propane	-3.3	Wet	0.82	R417A.mix	-0.7	Wet	0.96

Anexos

propylene	-4.2	Wet	0.77	R418A.mix	-2.4	Wet	0.87
propyne				R419A.mix	-0.7	Wet	0.96
sulfur dioxide				R420A.mix	-0.9	Wet	0.95
sulfur hexafluoride				R421A.mix	-0.7	Wet	0.96
toluene	1.1	Dry	0.94	R421B.mix	-0.7	Wet	0.96
trans-butene				R422A.mix	-0.7	Wet	0.96
trifluoroiodomethane				R422B.mix	-0.7	Wet	0.96
water	-13.2	Wet	0.28	R422C.mix	-0.7	Wet	0.96
xenon				R422D.mix	-0.7	Wet	0.96
R11	-0.4	Isentropic	0.98	R423A.mix	-0.2	Isentropic	0.99
R12	-1.0	Wet	0.95	R424A.mix	-0.7	Wet	0.96
R13	-2.1	Wet	0.89	R425A.mix	-1.5	Wet	0.92
R14				R426A.mix	-0.9	Wet	0.95
R21	-1.3	Wet	0.93	R427A.mix	-1.5	Wet	0.92
R22	-2.4	Wet	0.87	R428A.mix	-0.9	Wet	0.95
R23	-4.4	Wet	0.76	R500.mix	-1.4	Wet	0.92
R32	-5.6	Wet	0.69	R501.mix	-2.1	Wet	0.89
R41	-9.9	Wet	0.46	R502.mix	-1.2	Wet	0.93
R113	0.5	Dry	0.97	R503.mix			
R114	0.4	Isentropic	0.98	R504.mix	-2.8	Wet	0.85
R115	0.0	Isentropic	1.00	R507A.mix	-1.1	Wet	0.94
R116				R508A.mix			
R123	0.2	Isentropic	0.99	R508B.mix			
R124	-0.1	Isentropic	0.99	R509A.mix	-0.7	Wet	0.96

Anexo 4. Diámetro

Diameter								
f [Hz]	60			50				
TC [°C]	20	30	40	20	30	40		
Fluid	D [m]	D [m]	D [m]	D [m]	D [m]	D [m]	Average	Score
acetone	0.57	0.57	0.58	0.68	0.69	0.70	0.63	0.62
ammonia	1.07	1.07	1.07	1.29	1.29	1.29	1.18	0.07
argon								
benzene	0.49	0.50	0.50	0.59	0.60	0.61	0.55	0.71
butane	0.54	0.54	0.53	0.64	0.64	0.64	0.59	0.66
butene								
carbon dioxide	0.52	0.45		0.62	0.55		0.54	0.72
carbon monoxide								
carbonyl sulfide	0.54	0.53	0.53	0.65	0.64	0.63	0.59	0.67
cis-butene.mix								
cyclohexane	0.47	0.47	0.48	0.56	0.57	0.58	0.52	0.73
cyclopropane	0.63	0.63	0.62	0.76	0.76	0.75	0.69	0.56
decane	0.35	0.36	0.36	0.42	0.43	0.44	0.40	0.86
deuterium								
dimethylether.mix								
dodecane								
ethane	0.56	0.51		0.68	0.61		0.59	0.66
ethanol	0.65	0.66	0.66	0.78	0.79	0.80	0.72	0.53
ethylene								
fluorine								
helium								
heptane	0.42	0.43	0.43	0.51	0.51	0.52	0.47	0.78
hexane	0.45	0.46	0.46	0.55	0.55	0.56	0.51	0.75
hydrogen (normal)								
hydrogen sulfide	0.73	0.73	0.73	0.88	0.88	0.87	0.80	0.45
isobutane	0.53	0.52	0.52	0.63	0.63	0.62	0.58	0.68
isobutene								
isohexane	0.45	0.46	0.46	0.54	0.55	0.55	0.50	0.75
isopentane	0.49	0.49	0.50	0.59	0.59	0.59	0.54	0.71
krypton								
methane								
methanol	0.78	0.79	0.80	0.94	0.95	0.96	0.87	0.38
neon								
neopentane	0.48	0.48	0.48	0.58	0.58	0.58	0.53	0.73
nitrogen								
nitrogen trifluoride								
nitrous oxide	0.53	0.50		0.63	0.60		0.56	0.69
nonane	0.37	0.38	0.38	0.45	0.45	0.46	0.42	0.84
octane	0.40	0.40	0.41	0.47	0.48	0.49	0.44	0.81
oxygen								
parahydrogen								
pentane	0.49	0.50	0.50	0.59	0.60	0.60	0.55	0.71
perfluorobutane								

Anexos

perfluoropentane								
propane	0.58	0.57	0.55	0.69	0.68	0.66	0.62	0.63
propylene	0.59	0.58	0.56	0.71	0.70	0.68	0.64	0.62
propyne	0.65	0.65	0.65	0.78	0.78	0.78	0.72	0.54
sulfur dioxide								
sulfur hexafluoride	0.25	0.23	0.21	0.30	0.28	0.25	0.25	1.00
toluene	0.45	0.46	0.46	0.54	0.55	0.55	0.50	0.75
trans-butene								
trifluoroiodomethane								
water	1.12	1.14	1.16	1.35	1.37	1.39	1.25	0.00
xenon								
R11	0.36	0.37	0.37	0.44	0.44	0.44	0.40	0.85
R12	0.36	0.36	0.35	0.43	0.43	0.42	0.39	0.86
R13	0.28			0.33			0.30	0.95
R14								
R21	0.42	0.43	0.43	0.51	0.51	0.51	0.47	0.78
R22	0.43	0.42	0.41	0.51	0.51	0.50	0.46	0.79
R23	0.35			0.42			0.39	0.87
R32	0.55	0.53	0.52	0.65	0.64	0.62	0.59	0.67
R41	0.60	0.57	0.53	0.72	0.68	0.63	0.62	0.63
R113	0.31	0.31	0.31	0.37	0.37	0.38	0.34	0.91
R114	0.31	0.31	0.31	0.37	0.37	0.37	0.34	0.91
R115	0.29	0.28	0.27	0.35	0.34	0.32	0.31	0.95
R116								
R123	0.34	0.34	0.34	0.41	0.41	0.41	0.38	0.88
R124	0.34	0.34	0.34	0.41	0.41	0.40	0.37	0.88
R125	0.32	0.30	0.29	0.38	0.37	0.35	0.33	0.92
R134a	0.39	0.38	0.37	0.46	0.46	0.45	0.42	0.84
R141b	0.39	0.40	0.40	0.47	0.48	0.48	0.44	0.82
R142b	0.41	0.41	0.40	0.49	0.49	0.48	0.45	0.81
R143a	0.39	0.38	0.36	0.47	0.45	0.43	0.41	0.84
R152a	0.49	0.49	0.48	0.59	0.59	0.58	0.54	0.72
R218	0.25	0.24	0.23	0.30	0.29	0.27	0.26	0.99
R227ea	0.29	0.29	0.28	0.35	0.35	0.34	0.32	0.94
R236ea	0.33	0.33	0.33	0.39	0.39	0.39	0.36	0.89
R236fa	0.32	0.32	0.32	0.39	0.39	0.38	0.35	0.90
R245ca	0.36	0.36	0.36	0.43	0.43	0.43	0.40	0.86
R245fa	0.36	0.36	0.36	0.43	0.43	0.43	0.39	0.86
R365mfc	0.34	0.35	0.35	0.41	0.41	0.42	0.38	0.87
RC318	0.28	0.27	0.27	0.33	0.33	0.32	0.30	0.95
air								
R401A.mix	0.41	0.41	0.40	0.49	0.49	0.48	0.45	0.80
R401B.mix	0.42	0.41	0.41	0.50	0.49	0.49	0.45	0.80
R401C.mix	0.40	0.39	0.39	0.48	0.47	0.47	0.43	0.82
R402A.mix	0.36	0.35	0.34	0.44	0.42	0.41	0.39	0.87
R402B.mix	0.39	0.38	0.37	0.47	0.46	0.44	0.42	0.84
R403A.mix	0.40	0.39	0.38	0.48	0.47	0.45	0.43	0.83
R403B.mix	0.36	0.35	0.33	0.43	0.42	0.40	0.38	0.87
R404A.mix	0.36	0.35	0.33	0.43	0.42	0.40	0.38	0.87

Anexos

R405A.mix	0.37	0.37	0.36	0.45	0.44	0.44	0.41	0.85
R406A.mix	0.43	0.43	0.42	0.51	0.51	0.51	0.47	0.79
R407A.mix	0.40	0.39	0.38	0.48	0.47	0.46	0.43	0.82
R407B.mix	0.36	0.35	0.34	0.43	0.42	0.41	0.39	0.87
R407C.mix	0.41	0.41	0.40	0.50	0.49	0.48	0.45	0.81
R407D.mix	0.41	0.40	0.39	0.49	0.48	0.47	0.44	0.81
R407E.mix	0.42	0.42	0.41	0.51	0.50	0.49	0.46	0.80
R408A.mix	0.40	0.39	0.38	0.48	0.47	0.46	0.43	0.82
R409A.mix	0.41	0.41	0.40	0.49	0.49	0.48	0.45	0.81
R409B.mix	0.41	0.41	0.40	0.49	0.49	0.48	0.45	0.81
R410A.mix	0.43	0.42	0.41	0.52	0.51	0.49	0.46	0.79
R410B.mix	0.42	0.41	0.40	0.51	0.49	0.48	0.45	0.80
R411A.mix	0.44	0.44	0.43	0.53	0.52	0.51	0.48	0.78
R411B.mix	0.44	0.43	0.42	0.52	0.52	0.51	0.47	0.78
R412A.mix	0.42	0.42	0.41	0.51	0.50	0.49	0.46	0.80
R413A.mix	0.38	0.37	0.36	0.45	0.44	0.43	0.41	0.85
R414A.mix	0.41	0.41	0.40	0.49	0.49	0.48	0.45	0.81
R414B.mix	0.40	0.40	0.39	0.48	0.47	0.47	0.43	0.82
R415A.mix	0.44	0.44	0.43	0.53	0.53	0.52	0.48	0.77
R415B.mix	0.48	0.48	0.47	0.58	0.57	0.56	0.52	0.73
R416A.mix	0.37	0.37	0.36	0.44	0.44	0.43	0.40	0.85
R417A.mix	0.36	0.36	0.34	0.44	0.43	0.41	0.39	0.86
R418A.mix	0.43	0.43	0.42	0.52	0.51	0.50	0.47	0.79
R419A.mix	0.36	0.35	0.34	0.43	0.42	0.41	0.38	0.87
R420A.mix	0.39	0.38	0.38	0.47	0.46	0.45	0.42	0.83
R421A.mix	0.35	0.34	0.33	0.42	0.41	0.40	0.38	0.88
R421B.mix	0.33	0.32	0.31	0.40	0.39	0.37	0.35	0.90
R422A.mix	0.33	0.32	0.31	0.40	0.39	0.37	0.35	0.90
R422B.mix	0.36	0.35	0.34	0.43	0.42	0.40	0.38	0.87
R422C.mix	0.34	0.32	0.31	0.40	0.39	0.37	0.36	0.90
R422D.mix	0.35	0.34	0.33	0.42	0.41	0.39	0.37	0.88
R423A.mix	0.34	0.34	0.33	0.41	0.40	0.39	0.37	0.88
R424A.mix	0.36	0.35	0.34	0.43	0.42	0.41	0.39	0.87
R425A.mix	0.41	0.40	0.39	0.49	0.48	0.47	0.44	0.81
R426A.mix	0.38	0.38	0.37	0.46	0.45	0.44	0.42	0.84
R427A.mix	0.40	0.39	0.38	0.48	0.47	0.46	0.43	0.82
R428A.mix	0.34	0.32	0.31	0.40	0.39	0.37	0.36	0.90
R500.mix	0.39	0.39	0.38	0.47	0.46	0.46	0.42	0.83
R501.mix	0.41	0.40	0.40	0.49	0.48	0.48	0.44	0.81
R502.mix	0.35	0.34	0.33	0.42	0.41	0.40	0.38	0.88
R503.mix								
R504.mix	0.40	0.38	0.36	0.48	0.46	0.44	0.42	0.83
R507A.mix	0.36	0.34	0.33	0.43	0.41	0.39	0.38	0.88
R508A.mix								
R508B.mix								
R509A.mix	0.31	0.30	0.29	0.38	0.36	0.34	0.33	0.92

Anexo 5. Ambiental

Environment and Health							
Property	AIT (°C)		Toxic		Flammable		Score
	Value	SubScore	Value	SubScore	Value	SubScore	
acetone	465	0.55	ND	0.3	Highly flammable	0.3	0.38
ammonia	651	0.94	Toxic	0	Flammable	0.3	0.41
argon	ND		ND		ND		0.00
benzene	498	0.62	Toxic		Highly flammable	0.3	0.31
butane	365	0.34	ND		Extremely flammable		0.11
butene	ND		ND		ND		0.00
carbon dioxide	ND	1.00	ND	0.5	Not flammable	1	0.83
carbon monoxide	ND		ND		ND		0.00
carbonyl sulfide	ND		ND		ND		0.00
cis-butene.mix	ND		ND		ND		0.00
cyclohexane	260	0.12	ND		Highly flammable		0.04
cyclopropane	ND		ND		ND		0.00
decane	210	0.01	ND		Flammable	0.5	0.17
deuterium	ND		ND		ND		0.00
dimethylether.mix	ND		ND		ND		0.00
dodecane	ND		ND		ND		0.00
ethane	ND		ND		ND		0.00
ethanol	363	0.33	low toxic	0.5	Highly flammable	0.3	0.38
ethylene	ND		ND		ND		0.00
fluorine	ND		ND		ND		0.00
helium	ND		ND		ND		0.00
heptane	285	0.17	ND		Highly flammable	0.3	0.16
hexane	225	0.04	ND		Highly flammable	0.3	0.11
hydrogen (normal)	ND		ND		ND		0.00
hydrogen sulfide	260	0.12	ND		Extremely flammable		0.04
isobutane	460	0.54	ND	0	Extremely flammable		0.18
isobutene	ND		ND		ND		0.00
isohexane	264	0.12	ND	0	Highly flammable	0.3	0.14
isopentane	420	0.45	ND	0	Extremely flammable		0.15
krypton	ND		ND		ND		0.00
methane	464	0.55	ND	0.5	Highly flammable	0.3	0.45
methanol	ND		ND		ND		0.00
neon	ND		ND		ND		0.00
neopentane	ND		ND		ND		0.00
nitrogen	ND		ND		ND		0.00
nitrogen trifluoride	ND		ND		ND		0.00
nitrous oxide	ND		ND		ND		0.00
nonane	205	0.00	ND		Flammable	0.5	0.17
octane	220	0.03	ND		Highly flammable	0.3	0.11
oxygen	ND		ND		ND		0.00
parahydrogen	ND		ND		ND		0.00
pentane	309	0.22	ND		Highly flammable	0.3	0.17
perfluorobutane	ND		ND		ND		0.00

Anexos

perfluoropentane	ND		ND		ND		0.00
propane	450	0.52	ND		Extremely flammable	0	0.17
propylene	460	0.54	ND		Extremely flammable	0	0.18
propyne	ND		ND		Extremely flammable	0	0.00
sulfur dioxide	ND		ND		ND		0.00
sulfur hexafluoride	ND		ND		ND		0.00
toluene	480	0.58	toxic	0	Highly flammable	0	0.19
trans-butene	ND		ND		ND		0.00
trifluoroiodomethane	ND		ND		ND		0.00
water	Not flammable	1.00	Not toxic	1	Not flammable	1	1.00
xenon	ND		ND		ND		0.00
R11	ND		toxic	0	ND		0.00
R12	ND		toxic	0	ND		0.00
R13	ND		ND		ND		0.00
R14	ND		ND		ND		0.00
R21	522	0.67	toxic	0	ND		0.22
R22	632	0.90	toxic	0	ND		0.30
R23	ND		toxic	0	ND		0.00
R32	ND		ND		ND		0.00
R41	ND		ND		ND		0.00
R113	680	1.00	toxic	0	ND		0.33
R114	ND		toxic	0	ND		0.00
R115	ND		toxic	0	ND		0.00
R116	ND		ND		ND		0.00
R123	ND		ND		ND		0.00
R124	ND		ND		ND		0.00
R125	ND		ND		ND		0.00
R134a	ND		toxic	0	ND		0.00
R141b	530	0.68	toxic	0	ND		0.23
R142b	632	0.90	toxic	0	Extremely flammable	0	0.30
R143a	ND		ND		ND		0.00
R152a	455	0.53	toxic	0	Extremely flammable	0	0.18
R218	ND		ND		ND		0.00
R227ea	ND		ND		ND		0.00
R236ea	ND		ND		ND		0.00
R236fa	ND		ND		ND		0.00
R245ca	ND		ND		ND		0.00
R245fa	ND		ND		ND		0.00
R365mfc	ND		ND		ND		0.00
RC318	ND		ND		ND		0.00
air	ND		ND		ND		0.00
R401A.mix	ND		ND		ND		0.00
R401B.mix	ND		ND		ND		0.00
R401C.mix	ND		ND		ND		0.00
R402A.mix	ND		ND		ND		0.00
R402B.mix	ND		ND		ND		0.00
R403A.mix	ND		ND		ND		0.00
R403B.mix	ND		ND		ND		0.00

Anexos

R404A.mix	ND		ND		ND		0.00
R405A.mix	ND		ND		ND		0.00
R406A.mix	ND		ND		ND		0.00
R407A.mix	ND		ND		ND		0.00
R407B.mix	ND		ND		ND		0.00
R407C.mix	ND		ND		ND		0.00
R407D.mix	ND		ND		ND		0.00
R407E.mix	ND		ND		ND		0.00
R408A.mix	ND		ND		ND		0.00
R409A.mix	ND		ND		ND		0.00
R409B.mix	ND		ND		ND		0.00
R410A.mix	ND		ND		ND		0.00
R410B.mix	ND		ND		ND		0.00
R411A.mix	ND		ND		ND		0.00
R411B.mix	ND		ND		ND		0.00
R412A.mix	ND		ND		ND		0.00
R413A.mix	ND		ND		ND		0.00
R414A.mix	ND		ND		ND		0.00
R414B.mix	ND		ND		ND		0.00
R415A.mix	ND		ND		ND		0.00
R415B.mix	ND		ND		ND		0.00
R416A.mix	ND		ND		ND		0.00
R417A.mix	ND		ND		ND		0.00
R418A.mix	ND		ND		ND		0.00
R419A.mix	ND		ND		ND		0.00
R420A.mix	ND		ND		ND		0.00
R421A.mix	ND		ND		ND		0.00
R421B.mix	ND		ND		ND		0.00
R422A.mix	ND		ND		ND		0.00
R422B.mix	ND		ND		ND		0.00
R422C.mix	ND		ND		ND		0.00
R422D.mix	ND		ND		ND		0.00
R423A.mix	ND		ND		ND		0.00
R424A.mix	ND		ND		ND		0.00
R425A.mix	ND		ND		ND		0.00
R426A.mix	ND		ND		ND		0.00
R427A.mix	ND		ND		ND		0.00
R428A.mix	ND		ND		ND		0.00
R500.mix	ND		ND		ND		0.00
R501.mix	ND		ND		ND		0.00
R502.mix	ND		ND		ND		0.00
R503.mix	ND		ND		ND		0.00
R504.mix	ND		ND		ND		0.00
R507A.mix	ND		ND		ND		0.00
R508A.mix	ND		ND		ND		0.00
R508B.mix	ND		ND		ND		0.00
R509A.mix	ND		ND		ND		0.00

Anexo 6. Selección de fluidos

Se remarcaron en rojo los 10 mejores fluidos por criterio y por calificación total

		Results				
	Importance	60%	20%	10%	10%	
Rank	Fluid	Efficiency	Wetness	Diameter	E&H	Total Score
1	benzene	0.44	0.149	0.0705	0.05	0.71
2	water	0.51	0.041	0.0000	0.15	0.70
3	acetone	0.43	0.141	0.0622	0.06	0.69
4	toluene	0.44	0.141	0.0753	0.03	0.68
5	ethanol	0.45	0.122	0.0533	0.06	0.68
6	R113	0.37	0.146	0.0911	0.05	0.65
7	R141b	0.39	0.149	0.0817	0.03	0.65
8	R21	0.39	0.140	0.0784	0.03	0.64
9	cyclohexane	0.40	0.139	0.0733	0.01	0.62
10	decane	0.37	0.121	0.0858	0.03	0.60
11	nonane	0.37	0.123	0.0837	0.03	0.60
12	R123	0.36	0.149	0.0878	0.00	0.59
13	heptane	0.36	0.128	0.0783	0.02	0.59
14	octane	0.37	0.125	0.0812	0.02	0.59
15	methanol	0.47	0.082	0.0384	0.00	0.59
16	pentane	0.34	0.140	0.0707	0.03	0.57
17	isohexane	0.34	0.133	0.0750	0.02	0.57
18	isopentane	0.32	0.141	0.0711	0.02	0.56
19	R365mfc	0.32	0.141	0.0874	0.00	0.55
20	hexane	0.32	0.133	0.0748	0.02	0.55
21	R11	0.31	0.147	0.0850	0.00	0.54
22	R114	0.29	0.147	0.0912	0.00	0.53
23	R245ca	0.29	0.146	0.0857	0.00	0.52
24	isobutane	0.27	0.146	0.0679	0.03	0.51
25	R142b	0.24	0.144	0.0808	0.04	0.51
26	R22	0.26	0.130	0.0790	0.04	0.51
27	R152a	0.28	0.130	0.0715	0.03	0.51
28	R245fa	0.28	0.147	0.0862	0.00	0.51
29	butane	0.28	0.148	0.0665	0.02	0.51
30	R236ea	0.27	0.145	0.0893	0.00	0.51
31	R12	0.27	0.142	0.0861	0.00	0.50
32	R124	0.27	0.149	0.0882	0.00	0.50
33	neopentane	0.28	0.141	0.0725	0.00	0.50
34	R406A.mix	0.27	0.138	0.0786	0.00	0.49
35	R415B.mix	0.28	0.131	0.0731	0.00	0.49
36	carbonyl sulfide	0.30	0.115	0.0667	0.00	0.48
37	R236fa	0.25	0.146	0.0900	0.00	0.48
38	R401C.mix	0.26	0.141	0.0820	0.00	0.48
39	R414A.mix	0.26	0.140	0.0808	0.00	0.48
40	R414B.mix	0.26	0.140	0.0819	0.00	0.48
41	R409A.mix	0.26	0.138	0.0807	0.00	0.48
42	R409B.mix	0.26	0.138	0.0807	0.00	0.48
43	R401B.mix	0.26	0.137	0.0801	0.00	0.48

Anexos

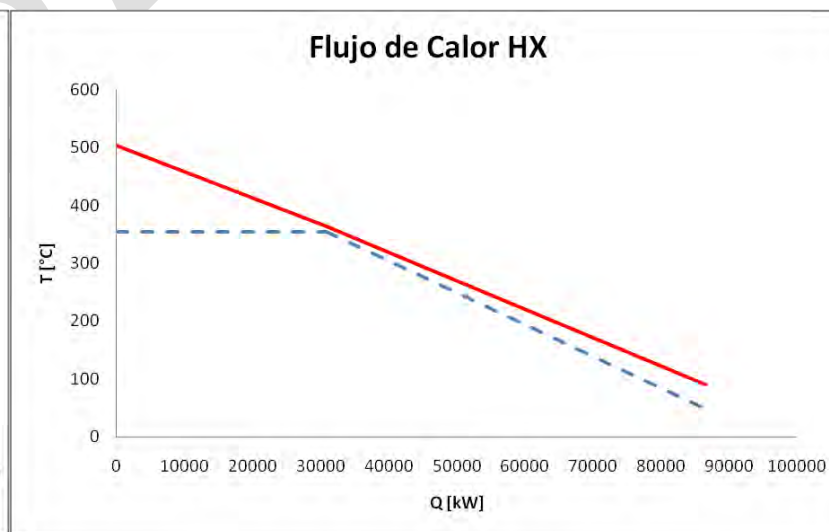
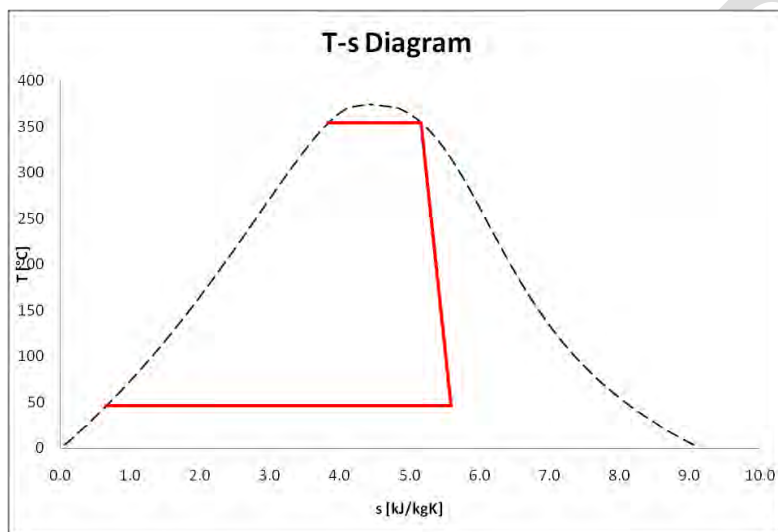
44	R500.mix	0.25	0.138	0.0829	0.00	0.47
45	R415A.mix	0.27	0.131	0.0772	0.00	0.47
46	R412A.mix	0.26	0.137	0.0795	0.00	0.47
47	R416A.mix	0.24	0.145	0.0852	0.00	0.47
48	R420A.mix	0.24	0.142	0.0832	0.00	0.47
49	R411A.mix	0.26	0.131	0.0776	0.00	0.47
50	R501.mix	0.25	0.133	0.0811	0.00	0.47
51	R418A.mix	0.26	0.130	0.0785	0.00	0.47
52	R405A.mix	0.24	0.144	0.0848	0.00	0.46
53	R411B.mix	0.26	0.130	0.0781	0.00	0.46
54	R134a	0.24	0.142	0.0837	0.00	0.46
55	R423A.mix	0.21	0.148	0.0885	0.00	0.45
56	R227ea	0.21	0.145	0.0938	0.00	0.45
57	RC318	0.21	0.143	0.0953	0.00	0.44
58	R413A.mix	0.22	0.144	0.0847	0.00	0.44
59	R425A.mix	0.22	0.138	0.0811	0.00	0.44
60	R401A.mix	0.22	0.138	0.0805	0.00	0.44
61	propane	0.22	0.123	0.0632	0.03	0.44
62	R403A.mix	0.22	0.135	0.0828	0.00	0.43
63	ammonia	0.36	0.000	0.0074	0.06	0.43
64	R407D.mix	0.21	0.138	0.0815	0.00	0.43
65	hydrogen sulfide	0.30	0.078	0.0451	0.01	0.43
66	propylene	0.22	0.116	0.0618	0.03	0.43
67	R407E.mix	0.21	0.134	0.0796	0.00	0.43
68	R402B.mix	0.20	0.136	0.0836	0.00	0.42
69	R408A.mix	0.21	0.134	0.0821	0.00	0.42
70	R502.mix	0.19	0.140	0.0877	0.00	0.42
71	R417A.mix	0.19	0.144	0.0864	0.00	0.42
72	R407C.mix	0.20	0.135	0.0807	0.00	0.42
73	R424A.mix	0.19	0.144	0.0868	0.00	0.42
74	R427A.mix	0.20	0.138	0.0822	0.00	0.42
75	R403B.mix	0.19	0.140	0.0872	0.00	0.41
76	R422B.mix	0.18	0.144	0.0872	0.00	0.41
77	R407A.mix	0.19	0.137	0.0824	0.00	0.41
78	R419A.mix	0.18	0.144	0.0869	0.00	0.41
79	R115	0.16	0.150	0.0945	0.00	0.41
80	R422D.mix	0.17	0.145	0.0880	0.00	0.40
81	R402A.mix	0.18	0.139	0.0866	0.00	0.40
82	R32	0.23	0.104	0.0667	0.00	0.40
83	R407B.mix	0.17	0.141	0.0868	0.00	0.39
84	R410A.mix	0.19	0.124	0.0790	0.00	0.39
85	R422C.mix	0.15	0.145	0.0898	0.00	0.39
86	R404A.mix	0.16	0.140	0.0872	0.00	0.39
87	R143a	0.17	0.136	0.0841	0.00	0.39
88	R421B.mix	0.15	0.145	0.0902	0.00	0.39
89	R422A.mix	0.15	0.145	0.0901	0.00	0.38
90	R507A.mix	0.15	0.141	0.0877	0.00	0.38
91	R509A.mix	0.14	0.144	0.0923	0.00	0.38
92	R125	0.13	0.144	0.0920	0.00	0.37

Anexos

93	R218	0.12	0.144	0.0991	0.00	0.36
94	R504.mix	0.15	0.127	0.0834	0.00	0.36
95	R13	0.05	0.133	0.0949	0.00	0.27
96	R23	0.04	0.114	0.0867	0.00	0.24
97	nitrous oxide	0.07	0.086	0.0689	0.00	0.23
98	R41	0.09	0.068	0.0631	0.00	0.22
99	argon	-	-	-	0.00	0.00
100	butene	-	-	-	0.00	0.00
101	carbon dioxide	0.04	-	0.0718	0.13	0.00
102	carbon monoxide	-	-	-	0.00	0.00
103	cis-butene.mix	-	-	-	0.00	0.00
104	cyclopropane	0.30	-	0.0561	0.00	0.00
105	deuterium	-	-	-	0.00	0.00
106	dimethylether.mix	-	-	-	0.00	0.00
107	dodecane	-	-	-	0.00	0.00
108	ethane	-	0.073	0.0664	0.00	0.00
109	ethylene	-	-	-	0.00	0.00
110	fluorine	-	-	-	0.00	0.00
111	helium	-	-	-	0.00	0.00
112	hydrogen (normal)	-	-	-	0.00	0.00
113	isobutene	-	-	-	0.00	0.00
114	krypton	-	-	-	0.00	0.00
115	methane	-	-	-	0.07	0.00
116	neon	-	-	-	0.00	0.00
117	nitrogen	-	-	-	0.00	0.00
118	nitrogen trifluoride	-	-	-	0.00	0.00
119	oxygen	-	-	-	0.00	0.00
120	parahydrogen	-	-	-	0.00	0.00
121	perfluorobutane	-	-	-	0.00	0.00
122	perfluoropentane	-	-	-	0.00	0.00
123	propyne	0.32	-	0.0538	0.00	0.00
124	sulfur dioxide	-	-	-	0.00	0.00
125	sulfur hexafluoride	0.06	-	0.1000	0.00	0.00
126	trans-butene	-	-	-	0.00	0.00
127	trifluoroiodomethane	-	-	-	0.00	0.00
128	xenon	-	-	-	0.00	0.00
129	R14	-	-	-	0.00	0.00
130	R116	-	-	-	0.00	0.00
131	air	-	-	-	0.00	0.00
132	R410B.mix	-	0.126	0.0802	0.00	0.00
133	R421A.mix	-	0.144	0.0876	0.00	0.00
134	R426A.mix	-	0.143	0.0838	0.00	0.00
135	R428A.mix	-	0.143	0.0898	0.00	0.00
136	R503.mix	-	-	-	0.00	0.00
137	R508A.mix	0.27	-	-	0.00	0.00
138	R508B.mix	-	-	-	0.00	0.00

Anexo 7. Balance Térmico del Escenario Base

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water
T [°C]	550	503.4	363.6	90.0	353.6	46.0	46.0	46.0	46	46.7	48.7	354	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	172.8	0.10	0.10	0.10	0.10	195.0	195.0	172.8	195.0	195.0
x	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	67%	0%	100%	60%	66%	66%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	3327.5	3260	2232	377	2537	1631	1767	1767	193	212	221	1701.6	235	332
s [kJ/kgK]	6.2	6.2	4.7	1.2	5.2	5.2	5.6	5.58	0.65	0.652	0.7	3.8	0.17	0.49
den [kg/m3]	82.3	65.0	205.29	965	123.1	0.11	0.10	0.10	990	998	997	559.3	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	36.88	36.88	36.88	36.88	36.88	36.88	36.88	36.9	598	598



Evaporador	
LMTD [°C]	52
U [W/m ² /K]	2500
Q [kW]	30823
A [m ²]	239
Precalentador	
LMTD [°C]	22
U [W/m ² /K]	1500
Q [kW]	55651
A [m ²]	1681
Condensador	
LMTD [°C]	15
U [W/m ² /K]	2000
Q [kW]	58063
A [m ²]	1907

W [MWe]	28.4
η_t	33.3%
η_r	32.4%
A HX total [m ²]	1919
η_{HX}	97%

Anexo 8. Sensibilidad, variación de la temperatura del recurso.

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water
T [°C]	500	452.6	363.6	90.0	353.6	46.0	46.0	46.0	46	46.7	48.7	354	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	172.8	0.10	0.10	0.10	0.10	195.0	195.0	172.8	195.0	195.0
x	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	2.0	50%	0%	100%	60%	66%	66%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	3150.1	3082	2118	377	2537	1631	1767	1767	193	212	221	1701.6	235	332
s [kJ/kgK]	5.9	5.9	4.5	1.2	5.2	5.2	5.6	5.58	0.65	0.652	0.7	3.8	0.17	0.49
den [kg/m3]	94.5	75.2	243.63	965	123.1	0.11	0.10	0.10	990	998	997	559.3	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	34.61	34.61	34.61	34.61	34.61	34.61	34.61	34.6	561	561

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water
T [°C]	450	403.9	363.6	90.0	353.6	46.0	46.0	46.0	46	46.7	48.7	354	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	172.8	0.10	0.10	0.10	0.10	195.0	195.0	172.8	195.0	195.0
x	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	1.7	27%	0%	100%	60%	66%	66%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	2926.3	2858	1974	377	2537	1631	1767	1767	193	212	221	1701.6	235	332
s [kJ/kgK]	5.6	5.6	4.2	1.2	5.2	5.2	5.6	5.58	0.65	0.652	0.7	3.8	0.17	0.49
den [kg/m3]	116.0	93.7	318.75	965	123.1	0.11	0.10	0.10	990	998	997	559.3	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	31.75	31.75	31.75	31.75	31.75	31.75	31.75	31.7	515	515

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water
T [°C]	400	363.7	206.8	90.0	196.8	46.0	46.0	46.0	46	46.7	48.7	197	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	14.6	0.10	0.10	0.10	0.10	195.0	195.0	14.6	195.0	195.0
x	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	1.0	0%	0%	100%	77%	82%	82%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	2510.4	2442	890	377	2790	2044	2156	2156	193	212	221	838.1	235	332
s [kJ/kgK]	5.0	5.0	2.4	1.2	6.5	6.5	6.8	6.80	0.65	0.652	0.7	2.3	0.17	0.49
den [kg/m3]	189.2	159.0	869.94	965	7.4	0.09	0.08	0.08	990	998	997	868.3	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.9	482	482

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water
T [°C]	350	337.0	199.2	152.2	189.2	46.0	46.0	46.0	46	46.7	48.7	189	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	12.3	0.10	0.10	0.10	0.10	195.0	195.0	12.3	195.0	195.0
x	0.0	-0.4	0%	0%	100%	78%	83%	83%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	1620.5	1552	856	642	2785	2063	2171	2171	193	212	221	803.8	235	332
s [kJ/kgK]	3.7	3.6	2.3	1.9	6.5	6.5	6.9	6.85	0.65	0.652	0.7	2.2	0.17	0.49
den [kg/m3]	629.5	644.9	878.52	915	6.3	0.09	0.08	0.08	990	998	997	877.0	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	10.54	10.54	10.54	10.54	10.54	10.54	10.54	10.5	215	215

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water
T [°C]	300	286.2	167.8	141.9	157.8	46.0	46.0	46.0	46	46.7	48.7	158	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	5.8	0.10	0.10	0.10	0.10	195.0	195.0	5.8	195.0	195.0
x	0.0	-0.8	0%	0%	100%	82%	85%	85%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	1330.8	1263	720	597	2755	2145	2236	2236	193	212	221	666.1	235	332
s [kJ/kgK]	3.2	3.1	2.0	1.8	6.8	6.8	7.1	7.05	0.65	0.652	0.7	1.9	0.17	0.49
den [kg/m3]	744.6	759.3	910.86	924	3.1	0.08	0.08	0.08	990	998	997	909.6	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	7.79	7.79	7.79	7.79	7.79	7.79	7.79	7.8	164	164

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water	water
T [°C]	250	235.6	141.9	128.9	131.9	46.0	46.0	46.0	46	46.7	48.7	132	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	2.9	0.10	0.10	0.10	0.10	195.0	195.0	2.9	195.0	195.0
x	0.0	-1.2	0%	0%	100%	85%	88%	88%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	1087.6	1020	610	542	2723	2221	2296	2296	193	212	221	554.7	235	332
s [kJ/kgK]	2.7	2.6	1.7	1.6	7.0	7.0	7.2	7.24	0.65	0.652	0.7	1.7	0.17	0.49
den [kg/m3]	821.9	835.1	934.50	936	1.6	0.08	0.08	0.08	990	998	997	933.2	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.7	123	123

Anexo 9. Sensibilidad, cambio del fluido de trabajo

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	acetone	acetone	acetone	acetone	acetone	acetone	acetone	acetone	water	water
T [°C]	550	503.4	422.2	128.9	234.0	46.0	46.0	46.0	46	51.2	56.2	234	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	46.2	0.71	0.71	0.71	0.71	195.0	195.0	46.2	195.0	195.0
x	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	180%	0%	100%	87%	91%	91%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	3327.5	3260	2953	542	579	423	446	446	-22	3	14	511.4	235	332
s [kJ/kgK]	6.2	6.2	5.8	1.6	1.3	1.3	1.4	1.40	-0.07	-0.069	0.0	1.2	0.17	0.49
den [kg/m3]	82.3	65.0	84.95	936	206.4	1.86	1.77	1.77	761	776	771	345.5	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	135.56	135.56	135.56	135.56	135.56	135.56	135.56	135.6	654	654

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	toluene	toluene	toluene	toluene	toluene	toluene	toluene	toluene	water	water
T [°C]	550	503.4	458.8	128.9	317.6	112.4	134.0	46.0	46	50.4	56.0	318	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	40.8	0.10	0.10	0.10	0.10	195.0	195.0	40.8	195.0	195.0
x	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	204%	0%	100%	120%	130%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	3327.5	3260	3106	542	584	368	400	279	-122	-99	-89	544.3	235	332
s [kJ/kgK]	6.2	6.2	6.0	1.6	1.2	1.2	1.2	0.91	-0.35	-0.347	-0.3	1.1	0.17	0.49
den [kg/m3]	82.3	65.0	73.70	936	238.5	0.30	0.28	0.36	842	855	850	351.5	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	115.49	115.49	115.49	115.49	115.49	115.49	115.49	115.5	621	621

Anexos

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	ethanol	ethanol	ethanol	ethanol	ethanol	ethanol	ethanol	ethanol	water	water
T [°C]	550	503.4	387.1	128.9	239.8	46.0	46.0	46.0	46	49.1	52.9	240	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	60.6	0.24	0.24	0.24	0.24	195.0	195.0	60.6	195.0	195.0
x	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	148%	0%	100%	80%	85%	85%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	3327.5	3260	2748	542	1312	1036	1077	1077	317	342	353	1124.6	235	332
s [kJ/kgK]	6.2	6.2	5.5	1.6	3.6	3.6	3.8	3.78	1.40	1.396	1.4	3.3	0.17	0.49
den [kg/m3]	82.3	65.0	106.04	936	156.2	0.53	0.51	0.51	767	783	780	367.8	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	81.98	81.98	81.98	81.98	81.98	81.98	81.98	82.0	642	642

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	R113	R113	R113	R113	R113	R113	R113	R113	water	water
T [°C]	550	503.4	428.8	128.9	213.1	73.8	84.2	46.0	46	52.4	58.3	213	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	33.4	0.96	0.96	0.96	0.96	195.0	195.0	33.4	195.0	195.0
x	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	185%	0%	100%	113%	119%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	3327.5	3260	2983	542	456	406	414	387	242	255	260	434.3	235	332
s [kJ/kgK]	6.2	6.2	5.8	1.6	1.7	1.7	1.7	1.60	1.14	1.142	1.2	1.6	0.17	0.49
den [kg/m3]	82.3	65.0	82.48	936	432.8	6.43	6.23	7.07	1512	1555	1543	709.6	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	381.19	381.19	381.19	381.19	381.19	381.19	381.19	381.2	674	674

Anexos

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D
Fluido	water	water	water	water	R141b	R141b	R141b	R141b	R141b	R141b	R141b	R141b	water
T [°C]	550	503.4	418.2	128.9	203.4	46.0	48.5	46.0	46	52.8	58.7	203	15
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	41.5	1.61	1.61	1.61	1.61	195.0	195.0	41.5	195.0
x	#Supercritical state (T>T _c , p>p _c)	#Supercritical state (T>T _c , p>p _c)	177%	0%	100%	97%	101%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	3327.5	3260	2934	542	525	461	471	469	253	269	276	492.5	235
s [kJ/kgK]	6.2	6.2	5.7	1.6	1.8	1.8	1.9	1.86	1.18	1.179	1.2	1.8	0.17
den [kg/m ³]	82.3	65.0	86.60	936	350.2	7.78	7.44	7.51	1192	1223	1213	570.9	1075
m [kg/s]	30	30	30	30	299.70	299.70	299.70	299.70	299.70	299.70	299.70	299.7	673

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	R21	R21	R21	R21	R21	R21	R21	R21	water	water
T [°C]	550	503.4	390.4	128.9	177.3	46.0	46.0	46.0	46	53.7	59.6	177	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	51.1	3.53	3.53	3.53	3.53	195.0	195.0	51.1	195.0	195.0
x	#Supercritical state (T>T _c , p>p _c)	#Supercritical state (T>T _c , p>p _c)	152%	0%	100%	79%	83%	83%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	3327.5	3260	2772	542	469	421	428	428	248	263	269	429.3	235	332
s [kJ/kgK]	6.2	6.2	5.5	1.6	1.7	1.7	1.7	1.73	1.16	1.163	1.2	1.6	0.17	0.49
den [kg/m ³]	82.3	65.0	103.06	936	383.9	18.81	18.06	18.06	1315	1352	1339	665.2	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	369.91	369.91	369.91	369.91	369.91	369.91	369.91	369.9	684	684

Anexos

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	cyclohexane	cyclohexane	cyclohexane	cyclohexane	cyclohexane	cyclohexane	cyclohexane	cyclohexane	water	water
T [°C]	550	503.4	463.7	128.9	279.5	120.7	136.2	46.0	46	51.0	56.6	279	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	40.2	0.31	0.31	0.31	0.31	195.0	195.0	40.2	195.0	195.0
x	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	207%	0%	100%	128%	138%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	3327.5	3260	3124	542	611	426	453	308	-71	-46	-35	577.4	235	332
s [kJ/kgK]	6.2	6.2	6.0	1.6	1.3	1.3	1.4	0.98	-0.21	-0.212	-0.2	1.2	0.17	0.49
den [kg/m ³]	82.3	65.0	72.55	936	229.8	0.81	0.78	1.00	754	768	763	318.6	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	119.40	119.40	119.40	119.40	119.40	119.40	119.40	119.4	645	645

	A	B	C	D	1	2s	2r	3l	3	4s	4r	5	D	E
Fluido	water	water	water	water	decane	decane	decane	decane	decane	decane	decane	decane	water	water
T [°C]	550	503.4	478.1	128.9	343.6	211.4	225.3	46.0	46	49.9	55.0	344	15	40
P [Bar]	260	195.0	195.0	195.0	20.7	0.01	0.01	0.01	0.01	195.0	195.0	20.7	195.0	195.0
x	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	#Supercritical state (T>Tc, p>pc)	215%	0%	100%	179%	209%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
h [kJ/kg]	3327.5	3260	3175	542	601	371	406	24	-325	-298	-286	572.0	235	332
s [kJ/kgK]	6.2	6.2	6.1	1.6	1.1	1.1	1.2	0.24	-0.85	-0.851	-0.8	1.1	0.17	0.49
den [kg/m ³]	82.3	65.0	69.49	936	190.0	0.02	0.02	0.04	710	723	720	276.5	1075	1064
m [kg/s]	30	30	30	30	88.06	88.06	88.06	88.06	88.06	88.06	88.06	88.1	663	663