



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

**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



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).

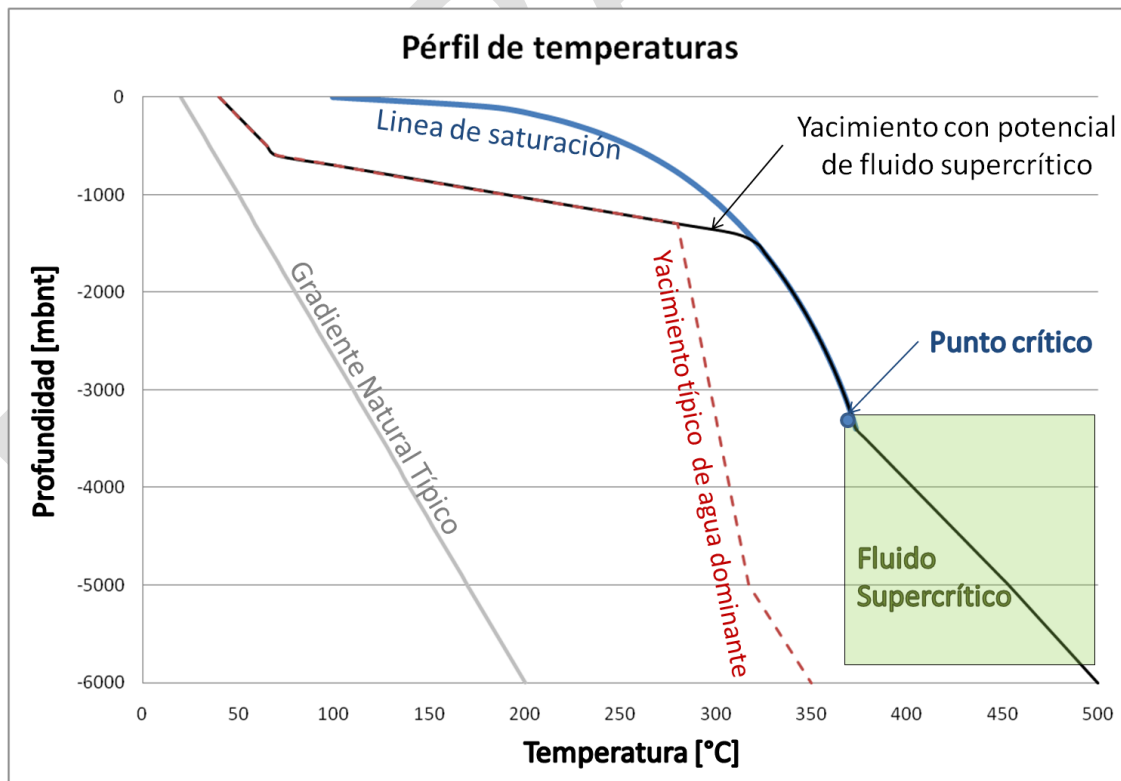


Figura 1 Perfil de temperaturas, indicio de yacimiento supercrítico

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>

Diagrama Temperatura - entropía del agua

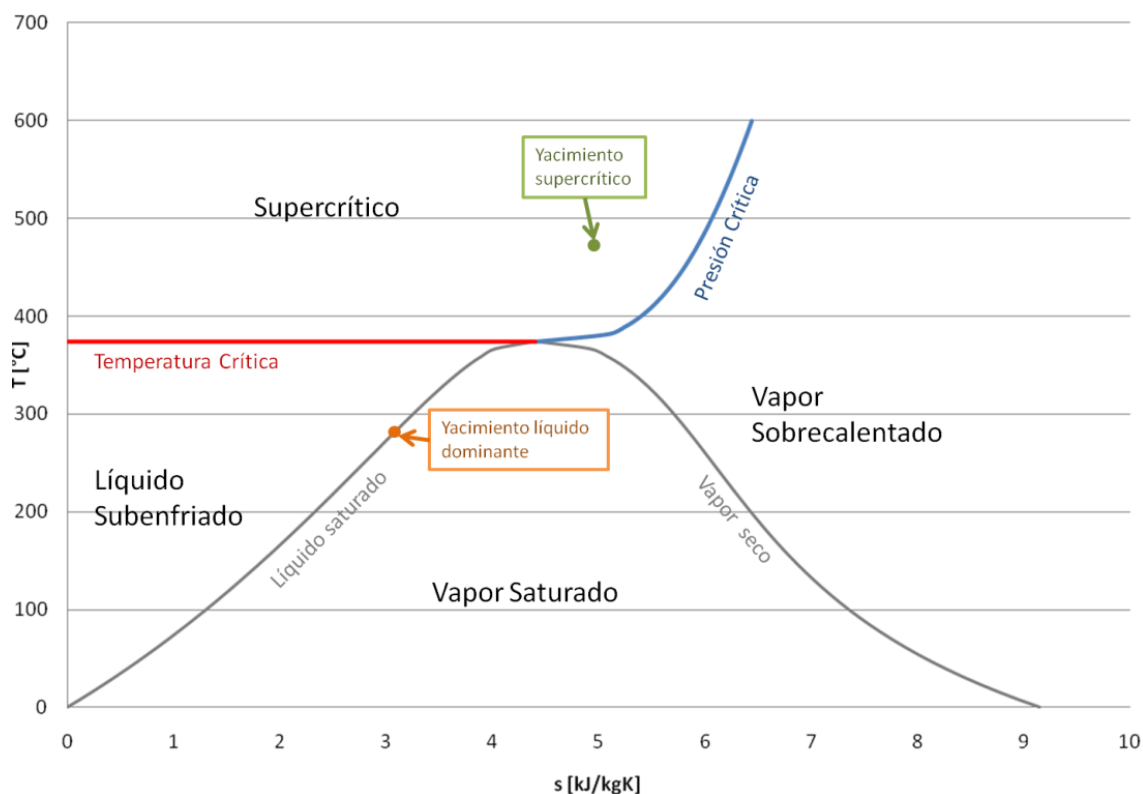


Figura 2 Diagrama T-s del agua mostrando las fases presentes

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 al anión cloruro y se ha sugerido que en profundidad puede haber un 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

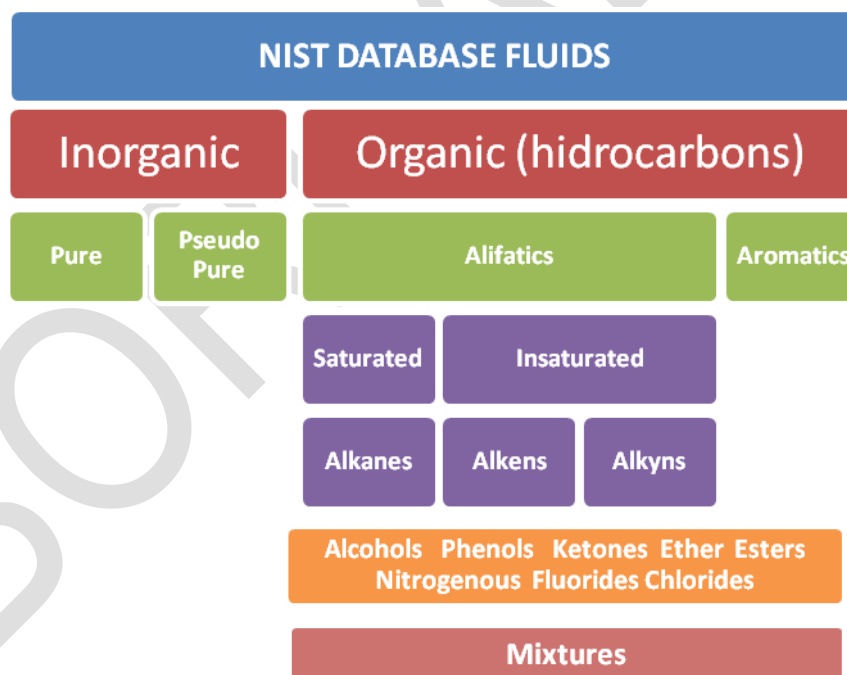
Este capítulo aprovecha el camino ya andado por aquellos que se han dedicado a recolectar y formar una buena base de datos de los fluidos que eventualmente pudieran servir para ser usados como fluido de trabajo en estas plantas. Luego viene la selección del mejor fluido de trabajo; en donde establecieron 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.

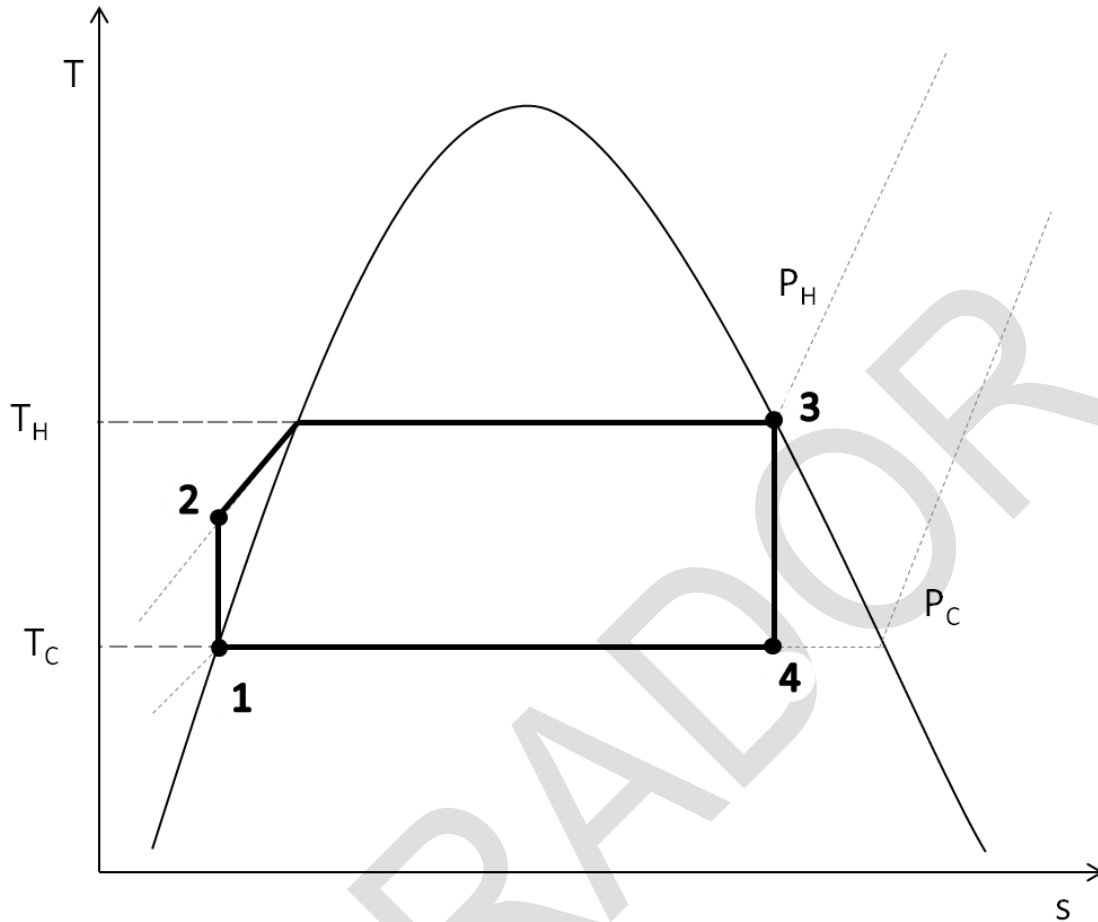


Figura 3 Diagrama general T-s de un ciclo Rankine (T_H, P_H condiciones de evaporación y T_C, P_C condiciones de condensación).

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

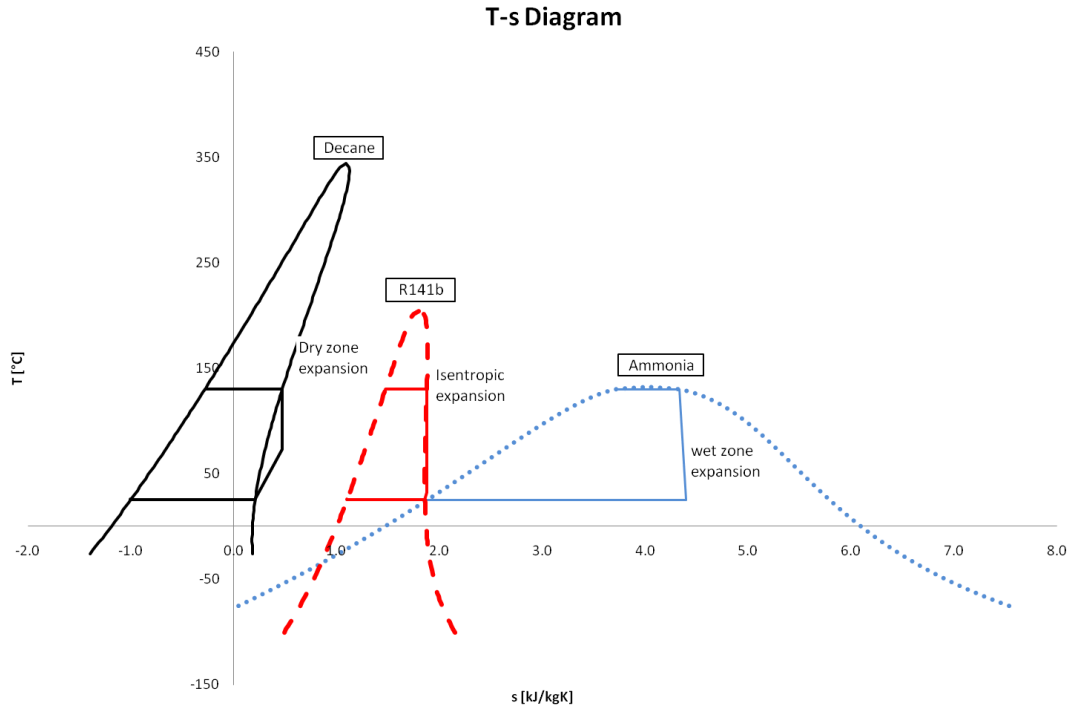


Figura 4 Diagrama T-s de fluidos típicos clasificados por humedad

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:

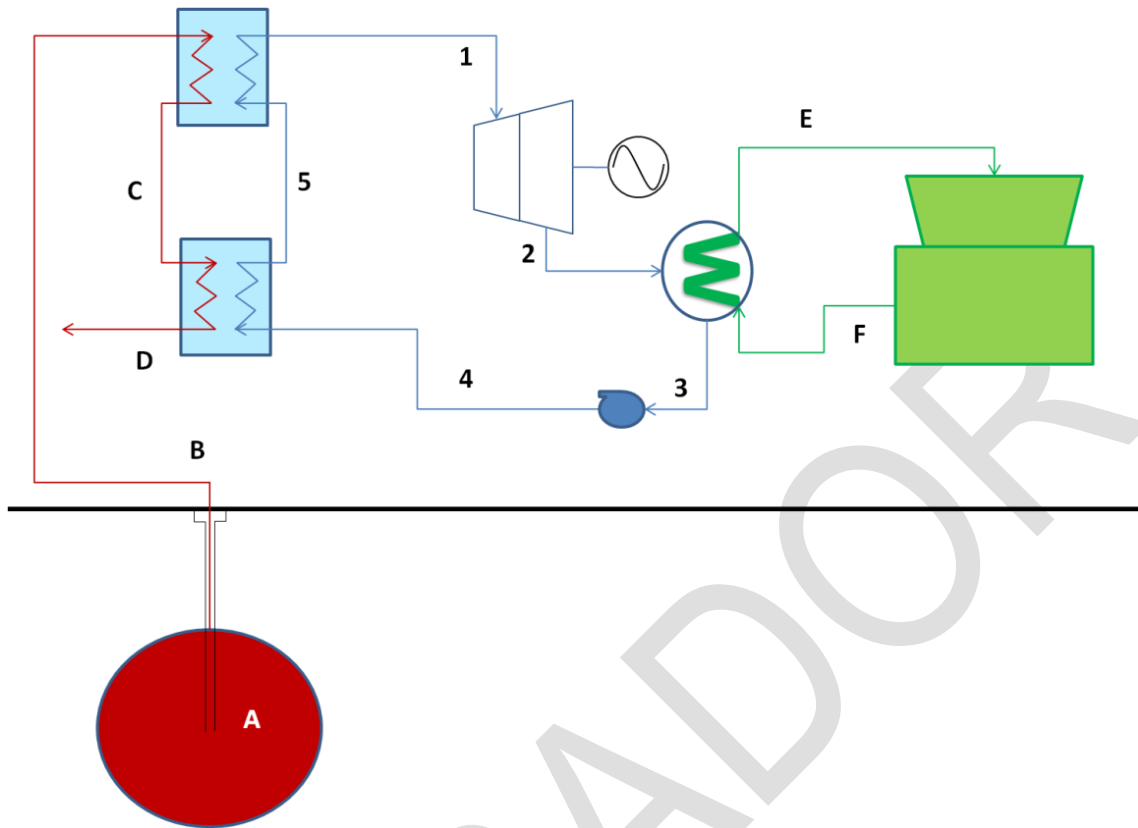


Figura 5 Ciclo Termodinámico y nomenclatura para cada estado.

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.

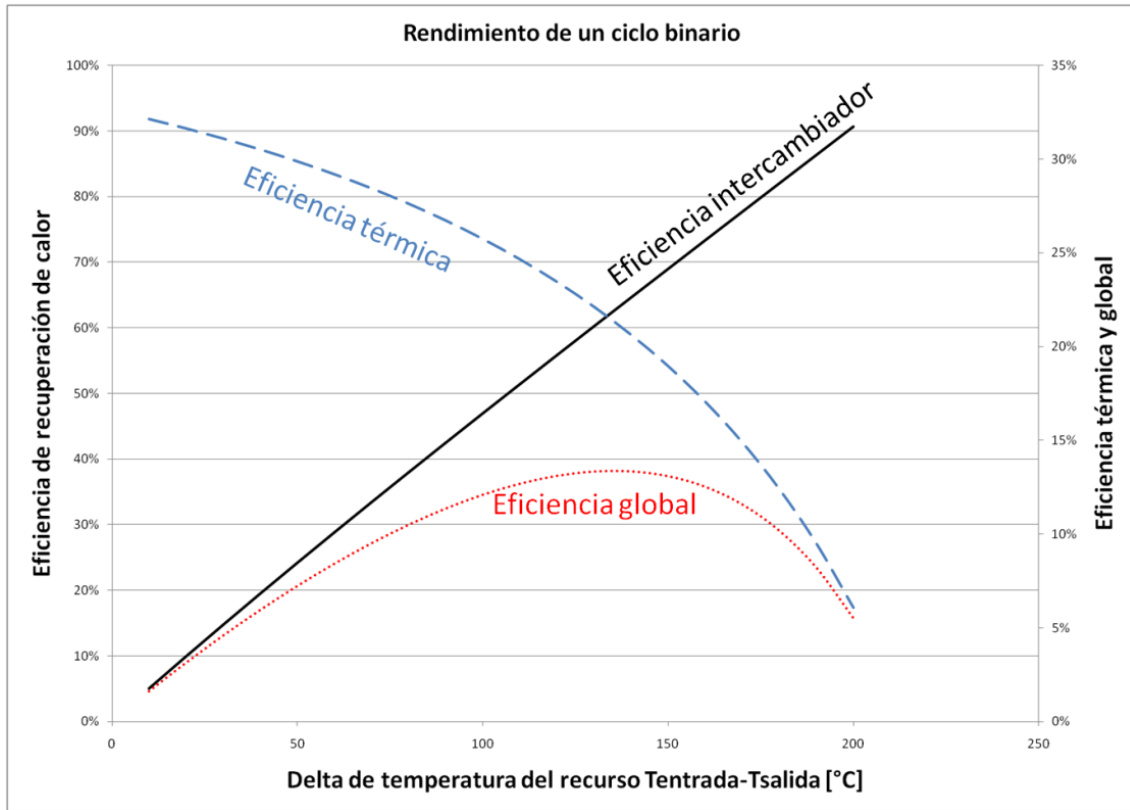


Figura 6 Rendimiento del ciclo binario

BORRÓN

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.

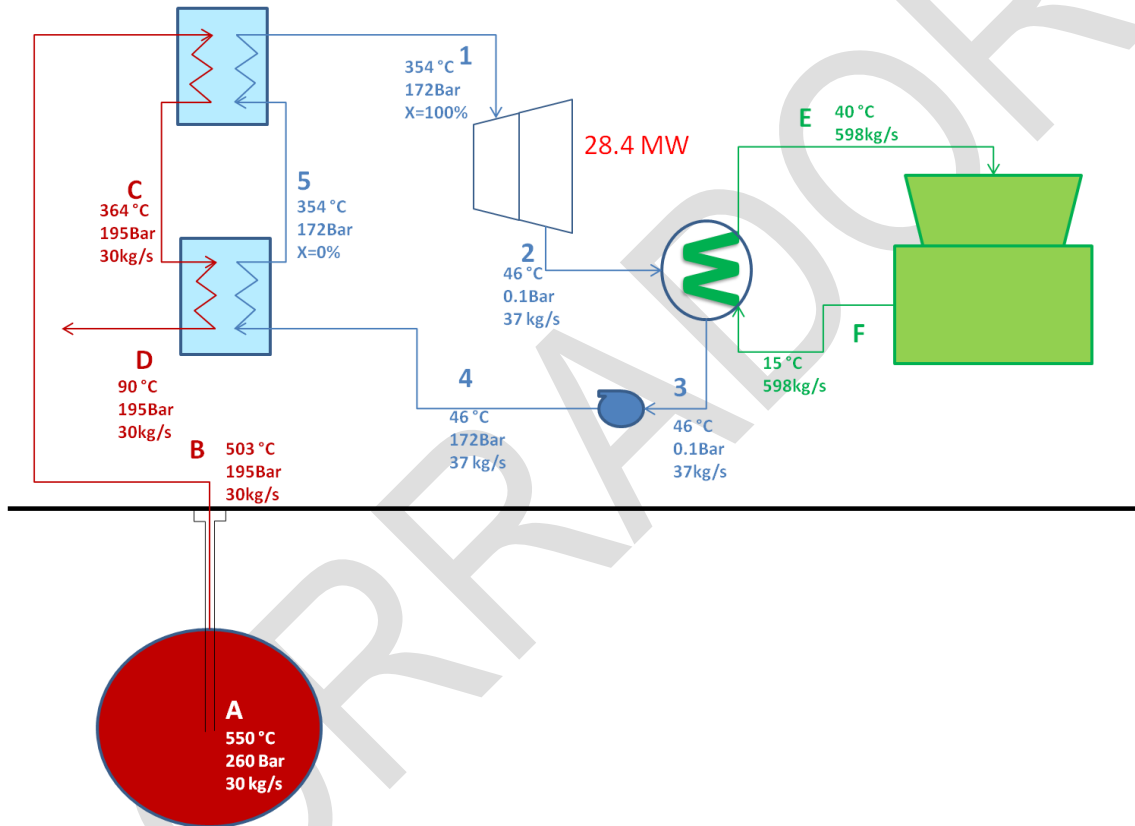


Figura 8 Balance térmico resumido del ciclo binario (escenario base).

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

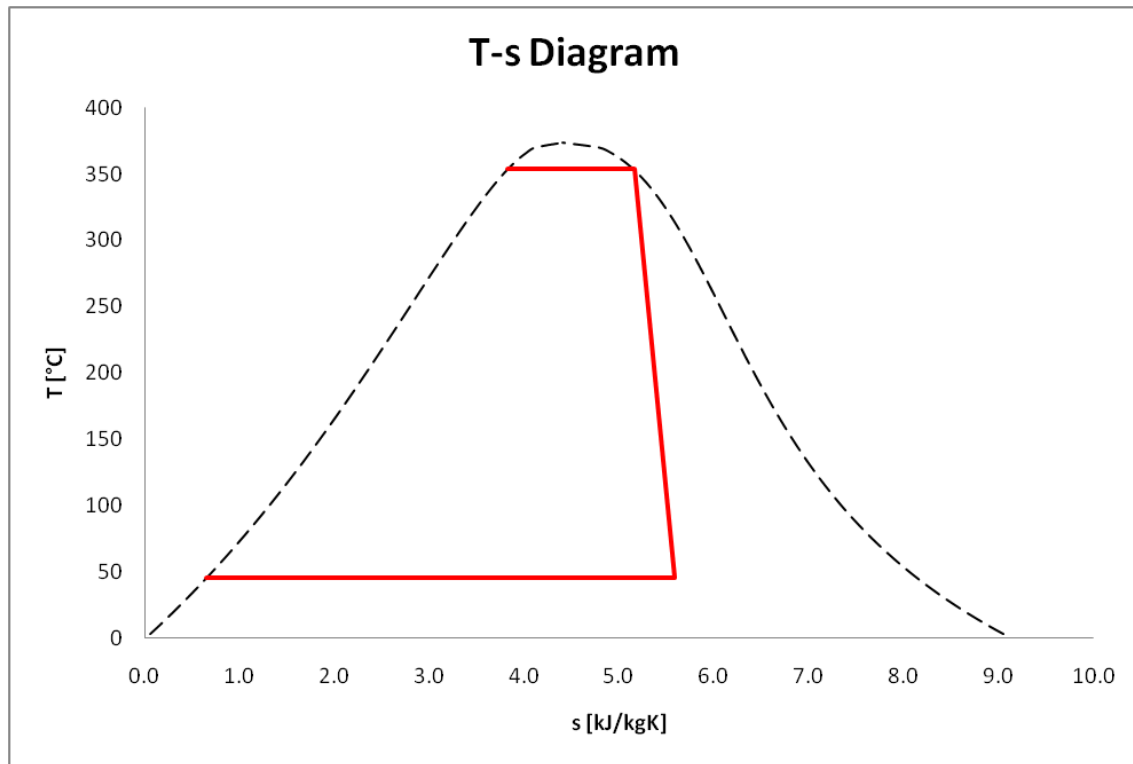


Figure 9 T-s Diagram of the generation system

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.

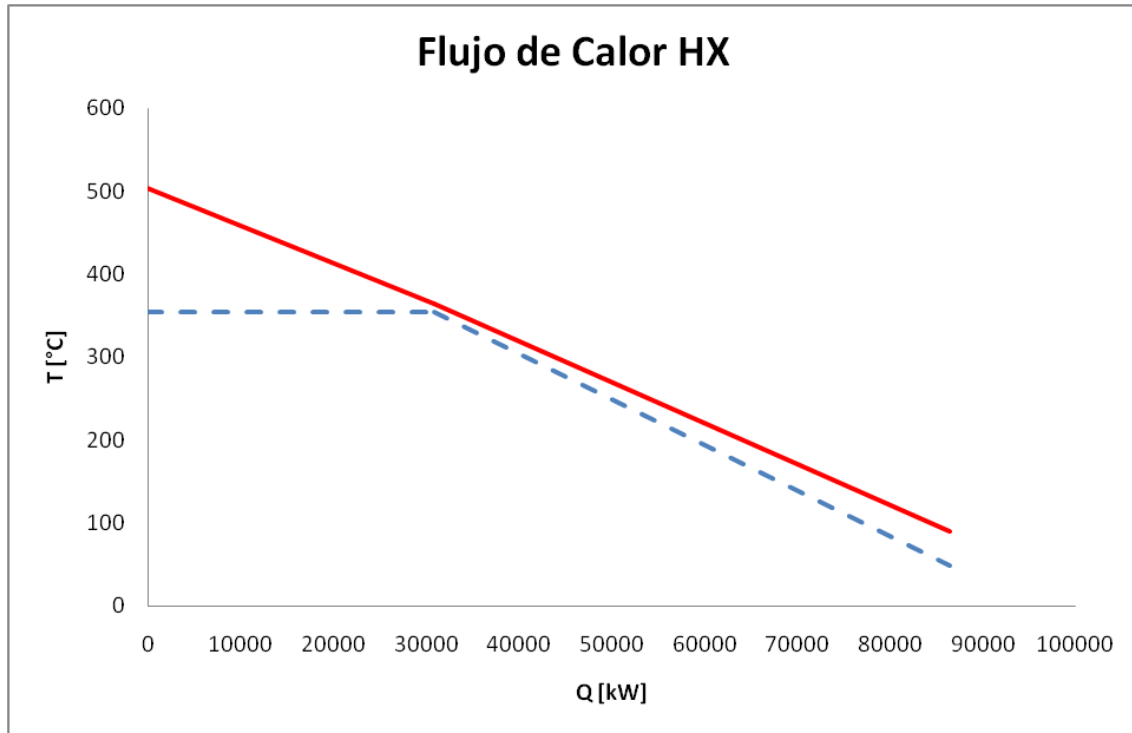


Figura 10 Diagrama de flujo de calor en los intercambiadores.

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 |

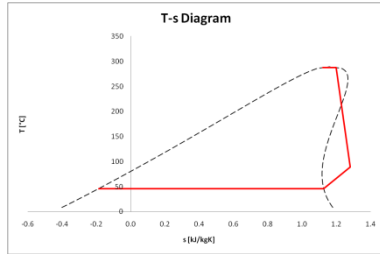
5.3.2. Fluido de trabajo

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.

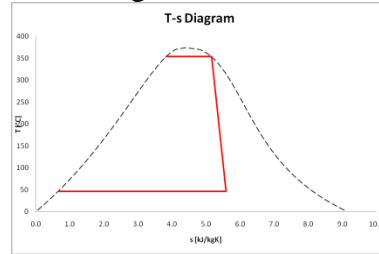
Se evaluó el sistema variando el fluido de trabajo (Anexo 9), los fluidos utilizados fueron los que mejor rendimiento presentaron en la evaluación del capítulo 2: benceno, agua, acetona, tolueno, etanol, R113, R141b, R21, ciclo-hexano y decano. Es importante hacer notar que el ciclo se consideró siempre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

The results were:

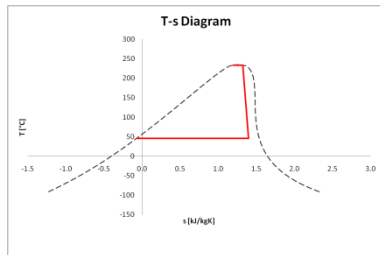
Benceno: 22 MW



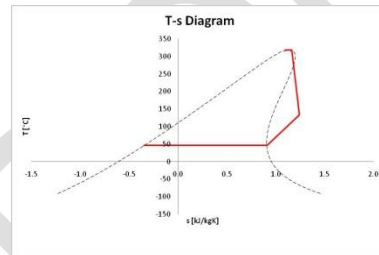
Agua: 28 MW



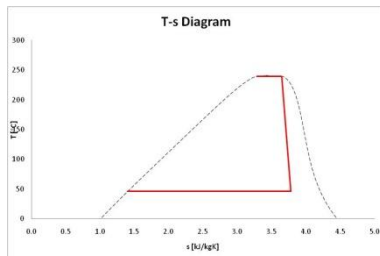
Acetona: 19 MW



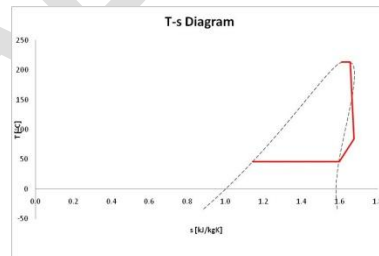
Tolueno: 22.5 MW



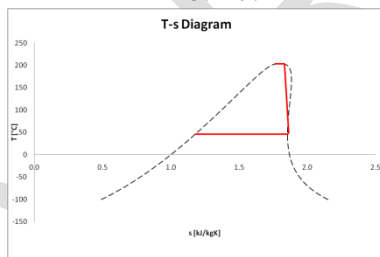
Etanol: 20.4



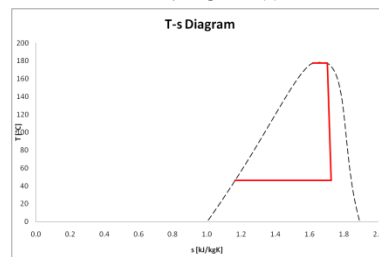
R113: 17.1 MW



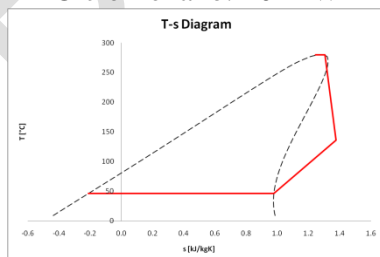
R141b: 17.2



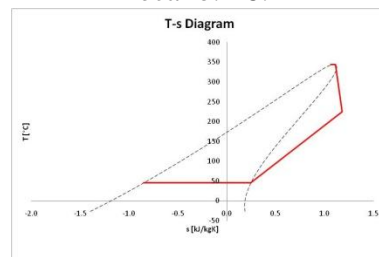
R21: 16 MW



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% | 11% | 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

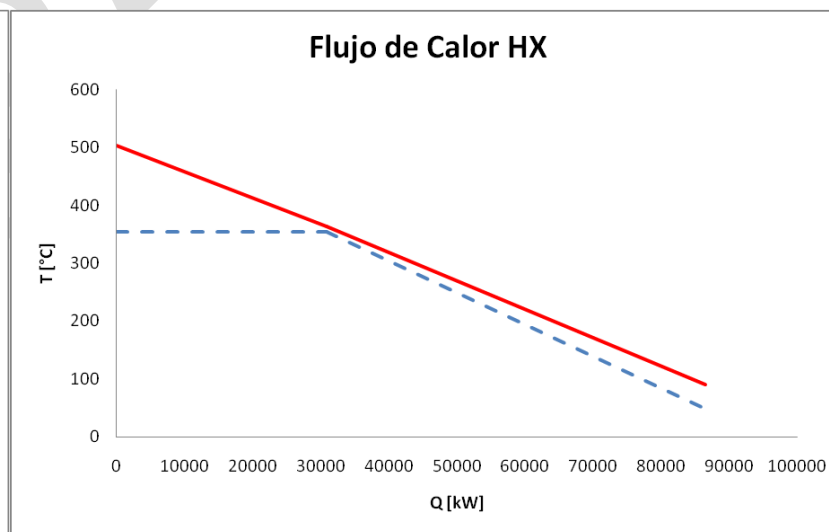
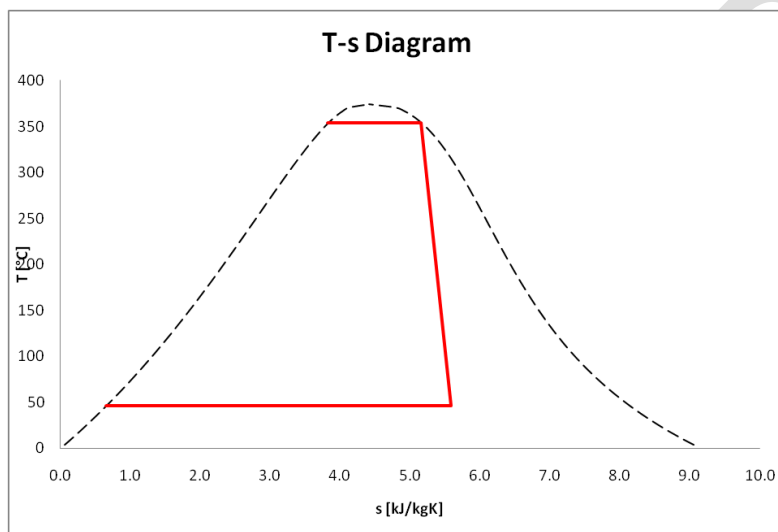
| | | | | | | |
|----|------------------|------|-------|--------|------|------|
| 44 | R500.mix | 0.25 | 0.138 | 0.0829 | 0.00 | 0.47 |
| 45 | R415A.mix | 0.27 | 0.131 | 0.0772 | 0.00 | 0.47 |
| 46 | R412A.mix | 0.26 | 0.137 | 0.0795 | 0.00 | 0.47 |
| 47 | R416A.mix | 0.24 | 0.145 | 0.0852 | 0.00 | 0.47 |
| 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 |