

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

**Generación de vapor en la industria petrolera: análisis de
las posibles aplicaciones y usos en la industria
ecuatoriana.**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
PETRÓLEOS**

LUIS ENRIQUE VALLEJO ESTRELLA

quique_vallejo@hotmail.com

DIRECTOR: MSc. ÁLVARO VINICIO GALLEGOS ERAS

alvaro.gallegos@epn.edu.ec

CODIRECTOR: JOSÉ LUIS RIVERA PARRA, PhD.

jose.riverap@epn.edu.ec

Quito, Enero de 2021

DECLARACIÓN

Yo, Luis Enrique Vallejo Estrella, declaro bajo juramento que el presente trabajo es de mi autoría, que no ha sido presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado todas las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo el derecho de propiedad intelectual del siguiente trabajo de titulación a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

A square image showing a handwritten signature in blue ink on a light-colored background. The signature is stylized and appears to be 'Luis Enrique Vallejo Estrella'.

LUIS ENRIQUE VALLEJO ESTRELLA

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el siguiente trabajo fue realizado por Luis Enrique Vallejo, bajo nuestra supervisión.

MSc. ÁLVARO VINICIO GALLEGOS ERAS
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

JOSÉ LUIS RIVERA PARRA, PhD
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

AGRADECIMIENTOS

Infinitas gracias a Dios por siempre estar conmigo.

A mis padres Luis y Rocío los pilares más importantes de mi vida.

A mi señora Juanita, que aunque ya no está aquí, siempre está conmigo.

A mis hermanos.

A mis amigos.

A mis maestros.

A mis compañeros.

DEDICATORIA

A mis cinco esperanzas, mis sobrinos.

Contenido

1. Introducción	9
2. Generalidades del agua de formación	10
3. Generación de vapor	15
4. Aplicaciones del vapor en la industria.....	23
5. Potenciales usos en la industria petrolera	33
6. Conclusiones y Recomendaciones.....	61
7. Bibliografía.....	62
8. Anexos.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 3.1 Elementos que constituyen un sistema de vapor.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4.1 Intercambiador de calor de tubos y coraza.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4.2 Horno de Vapor.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4.3 Calentamiento con Calor (Vapor) Latente. Olla enchaquetada.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4.4 Turbina de Vapor</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4.5 Eyector para condensador de superficie.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 4.6 Quemador asistido por vapor.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.7 Limpieza de la tubería de la caldera con los sopladores de hollín.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4.8 Molino acondicionador de bolitas.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4.9 Humidificador de vapor en ductos de aire.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 5.1 Proceso de calentamiento de crudo en las estaciones de bombeo del OCP.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.2 Calentamiento de crudo antes del tanque de lavado.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.3 Porcentajes de cada costo asociado a la producción de vapor (fuel oil).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.4 Porcentajes de cada costo asociado a la producción de vapor (gas natural).....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.5 Porcentajes de cada costo asociado a la producción de vapor (gas natural/teas)....</i>	<i>60</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Análisis fisicoquímico del agua de formación del pozo re-inyector SAC-23 _____	34
Tabla 5.2 Los principales contaminantes en el vapor de las turbinas y sus efectos _____	35
Tabla 5.3 Rangos esperados y valores límite para asegurar la calidad dentro de la turbina _____	36
Tabla 5.4 <i>Valores límites de impurezas recomendados por el comité investigador de ASME para el agua de alimentación y el agua de calderas, para calderas a diferentes presiones de trabajo.</i> _____	37
Tabla 5.5 Productos químicos y su empleo en el tratamiento de aguas para vapor. _____	38
Tabla 5.6 Análisis físico químico del agua de formación Edén Yuturi. _____	43
Tabla 5.7 Análisis físico-químico del agua de formación Campo Palo Azul. _____	45
Tabla 5.8 Análisis físico-químico del agua de formación de la Estación Guanta. _____	47
Tabla 5.9 Análisis físico-químico del agua de formación del Campo Shushufindi. _____	48
Tabla 5.10 Análisis físico-químico del agua de formación de la Estación Central del Campo Sacha. __	50
Tabla 5.11 Análisis físico-químico del agua de formación bloque 16. _____	54
Tabla 5.12 Costos para generar vapor con fuel oil 4 _____	57
Tabla 5.13 Costos para generar vapor con gas natural. _____	58
Tabla 5.14 Costos para generar vapor con gas natural sin costo. _____	59

1. Introducción

En la industria del petróleo es necesario buscar procesos alternativos para generar energía optimizando el desperdicio de desechos industriales como el agua de formación, lodos de perforación entre otros, que pueden crear grandes ahorros en los costos de producción de una empresa y también de alguna manera ayudar a la protección del medio ambiente donde se desarrollan los procesos de producción. Una de las alternativas que se desarrollara a lo largo de este trabajo es el uso del vapor a partir del agua de formación en diferentes actividades de la industria ecuatoriana y con un enfoque más profundo en la industria petrolera.

El vapor de agua puede ser manejado habitualmente como una fuente de calor y también potencia mecánica. En la industria térmica, el vapor de agua se expandirá en una turbina, la energía se transforma en potencia mecánica, y esta a su vez en potencia eléctrica. En los diferentes procesos de la industria el vapor de agua es usado como fuente de calor para distintas aplicaciones, tales como la limpieza, humidificación, calentamiento, como fluido motriz, para hidratación y otras aplicaciones menores (Lostanau, 2013).

La materia prima para generar el vapor para distintas aplicaciones será principalmente el agua de formación producida en la explotación de petróleo porque es un subproducto poco deseado para esta industria que encarece el proceso debido a que requieren recursos económicos para dar tratamiento físico-químico y mantenerla solamente almacenada, además puede traer problemas ambientales.

El objetivo primordial del reúso del agua de formación es optimizar los procedimientos en la industria petrolera, la reducción del número de vertimientos y con ello la ecoeficiencia en la industria hidrocarburífera; cuya meta será lograr maximizar las utilidades del yacimiento, optimizar la producción del hidrocarburo y por último minimizar las inversiones de capital, así como los gastos de operación, para lo cual se necesitará aplicar las más alta tecnología disponible en el mercado dentro del entorno de gestión dado (Martínez & Konopczynski, 2002).

2. Generalidades del agua de formación

Según el Reglamento Ambiental de Operaciones Hidrocarburíferas, Acuerdo Ministerial 100 Registro Oficial 174 de 01 de abril de 2020 vigente, en el artículo 40, numeral 1: el agua de formación no deberá descargarse en el ambiente debiendo esta como primera opción reinyectarse. En el numeral 2 indica que en caso de descargar en el entorno, esta debe cumplir con los límites establecidos para el caso: “si estos fluidos se dispusieren en otra forma que no sea a cuerpos de agua ni mediante reinyección, en el Plan de Manejo Ambiental se establecerán los métodos, alternativas y técnicas que se utilizarán para su disposición con indicación de su justificación técnica y ambiental; los parámetros a cumplir serán los aprobados en el Plan de Manejo Ambiental”, es decir, que el uso de agua de formación para generar vapor está regulado en este reglamento y deberá incluirse en un Plan de Manejo Ambiental. A continuación, se describirán las generalidades del agua de formación, algunas propiedades y características.

Gran parte de las rocas de yacimiento son formadas en el agua, mediante el depósito continuo de pequeños granos de rocas conocidos también como detritus. A medida que los sedimentos se compactan, al agua queda atrapada en el volumen poral de las rocas se le denomina agua connata; cuando el yacimiento está siendo perforado empieza a salir el agua entrampada que ahora se llamara agua de formación, la que será mencionada permanentemente en análisis para generación de vapor (Abdou, 2011).

La composición del agua connata varía según el ambiente donde se deposita. En ambientes de mar, se tratará de agua marina. En ambientes pantanosos y de ríos, se tratará de agua dulce. Y en ambientes evaporíticos, el agua en los poros de la roca es agua conocida como salmuera con valores de salinidad más altos que el agua de mar (Abdou, 2011).

Esta agua dulce proveniente de depósitos lacustres y fluviales tienen una salinidad de 0,11 partes por mil, mientras que la salmuera tiene una salinidad de 7 a 270 partes por millón (Warren, 2006), debido a esto es que el usar agua dulce para generar vapor incurriría en menos tratamientos y costos para desalinizar el agua.

Las características del agua de producción, es decir, su composición fisicoquímica obedece a la naturaleza química de la formación geológicas donde se encuentra, y contiene principalmente sales minerales como calcio, magnesio, potasio, estroncio, bario, hierro, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, hidróxidos, bromuros, y ácidos débiles no volátiles, combinaciones orgánicas, gases en solución tal como el dióxido de carbono, el ácido sulfhídrico, nitrógeno, ácidos orgánicos, bacterias sulfato-reductoras y algunas trazas de compuestos de hidrocarburos, entre otros (Córdova, 2017).

Propiedades del agua de formación.

Potencial Hidrógeno (pH)

Es la medida de cuan básica o ácida es el agua. Está representada con la siguiente expresión:

$$pH = -\log[H^+]$$

También muestra cuan concentrados están los iones de hidronio $[H_3O]^+$ presentes en ciertas disoluciones. Se ha definido la escala de potencial hidrógeno que va desde 0 hasta 14 e indica si un compuesto es básico o ácido. Los compuestos son alcalinos cuando marcan un valor en la escala pH mayor a 7, son ácidos cuando el valor de pH marca valores menores que 7 y son neutros cuando el pH es igual a 7 (Barrera, 2014).

Alcalinidad

Con alcalinidad se puede medir cuan capaz es una sustancia para neutralizar soluciones acidas. Esta característica se ve beneficiada por la presencia de tres iones: bicarbonato, carbonato y oxhidrilo; y además, por la aparición de fosfatos y ácidos débiles. Debido a esto que al realizarse el tratamiento del agua de formación, esta debe tener una alcalinidad aceptable para impedir la presencia de estos iones que son los causantes de daños a la formación, a los dispositivos de producción de hidrocarburos y de producción de vapor. (Barrera, 2014).

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La contaminación orgánica del agua se la puede medir con este índice (DQO). Durante el procedimiento de tratar el agua, hay que evitar el contacto con el oxígeno, debido a

que este origina la proliferación de bacterias causantes de corrosión en los dispositivos de producción de vapor. (Barrera, 2014).

Sólidos Disueltos Totales (TSS)

Son sólidos formados por material particulado que tiende a sedimentar con facilidad, los sólidos y coloides que se encuentran suspendidos, son interceptados por un filtro y luego se secan en un rango de temperatura entre 103°C y 105°C. Entre los más sobresalientes están: catión sodio (Na⁺), anión cloruro (Cl⁻). Los cationes más frecuentes son: calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), hierro (Fe²⁺), potasio (K⁺), estroncio (Sr⁺), bario (Ba²⁺), aluminio (Al³⁺), y litio (Li⁺) . En el tratamiento de agua para vapor, se debe reducir la concentración de los sólidos disueltos principalmente porque estos tienden a formar incrustaciones en los equipos de producción de vapor (Arnold & Stewart, 2010).

Turbiedad

Es la característica del líquido mide cuan clara es o no, y es debido principalmente a partículas de tamaño coloidal que se encuentran disueltas y suspendidas, como la arcilla, materia inorgánica u orgánica, y otras más. La medición de la turbidez es realizada con un nefelómetro o turbidímetro en unidades NTU, la cual mide la concentración de sólidos disueltos (Cantos, 2017).

El agua de formación que va a ser sometida a tratamiento debe ser lo más clara posible, es decir tiene que mantener un valor bajo de NTU, parámetro que obedece a la reglamentación medioambiental para cada aplicación. (Cantos, 2017).

Coloides

Son pequeñas partículas de origen inorgánico u orgánico cuyo tamaño varía entre los 10,4 a 10,5 milímetros. Se debe tener cuidado con la elección de los filtros ya que por este tamaño pueden atravesarlos. En el tratamiento de agua se los puede eliminar por precipitación o floculación u otros métodos ya que estos originan sólidos suspendidos que pueden ocasionar daños en los equipos (Cantos, 2017).

Sólidos precipitados (incrustaciones)

El problema más frecuente que presenta el agua de formación son los iones que esta tiene, es que dichos iones reaccionan para formar precipitados debido a los variaciones de presión y temperatura o en su composición. Estos sólidos precipitados ocasionan problemas de incrustaciones en tuberías, equipos de tratamiento de agua, equipos de producción de vapor, entre otros (Cantos, 2017).

Cationes

Ion Sodio

El problema que causa es la precipitación de NaCl en salmueras con alto grado de salinidad. El ion sodio cuando se combina con diferentes iones puede ocasionar corrosión de los dispositivos de generación de vapor (Cantos, 2017)

Ion Calcio

Es fácil de combinarse con iones de carbonato, sulfato o bicarbonato. Al precipitarse puede formar escalas o sólidos en suspensión (Cantos, 2017).

Iones de Magnesio

Estos iones tienden a formar escalas de CaCO_3 mediante la precipitación del ion calcio. Los iones de magnesio pueden disminuir la adherencia de estos iones de CaSO_4 , BaSO_4 y SrSO_4 (Arpel, 2009)

Hierro

Si este ion está presente en el agua es un indicativo de corrosión de los equipos por donde el agua de formación tratada previamente transitó. Puede estar en una disolución como ion férrico (Fe^{+++}) o también como una solución de ion ferroso como precipitado. La presencia de precipitados de hierro puede causar taponamientos en los equipos de producción de vapor (Arpel, 2009).

Bario

El bario tiene la ventaja de formar sulfato de bario, compuesto que es muy insoluble y en pequeñas proporciones puede causar deterioro en los equipos (Arpel, 2009).

Estroncio

Así como el bario y el calcio, el estroncio tiene la posibilidad de combinarse con el ion sulfato para crear sulfato de estroncio tan insoluble como el sulfato de bario. (Arpel, 2009).

Aniones

Ion Cloro

El cloro se encuentra frecuentemente en soluciones salinas, es decir, este ion viene generalmente del cloruro de sodio, debido a esto la concentración de este ion es usada para la medición del contenido de sal en el agua. El primer inconveniente relacionado con este ion es que produce una agresiva corrosión cuando está como cloruro de sodio. También, cloro es un compuesto equilibrado y su concentración es muy sencilla de detectar en el agua (Arpel, 2009).

Iones carbonato, sulfato y bicarbonato.

Instituyen un serio inconveniente por la facilidad de reaccionar con el calcio, bario, hierro o estroncio para formar escalas adherentes de muy baja solubilidad. Los iones sulfato son causa de la proliferación de bacterias sulfato reductoras. Los iones bicarbonato tienen una presencia casi constante en todos los tipos de agua. Los carbonatos tienen una menor presencia en las agua de producción debido a que el pH tiene comúnmente valores menores a 8,3 (Arpel, 2009)

Petróleo excedente

Es un residuo del petróleo presente en el agua de formación después de los procesos de separación y deshidratación agua-petróleo. La expresión petróleo excedente, conocida además como aceite residual en sector hidrocarburos se la puede medir en unidades de mg/l o también en ppm (APHA, 1998).

Este aceite residual trae dificultades de operación en las facilidades de superficie, y además, contribuye con altos grados de toxicidad que pueden afectar a la vida y al medio ambiente, que de acuerdo con la Tabla 4 del anexo 2 del Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburiíferas vigente, el valor permitido de hidrocarburos totales debe

ser menor a 20 mg/l. La eficiencia en los procesos de separación agua-petróleo es un parámetro importante que determina la cantidad de petróleo residual presente en el agua.

Características físicas del agua de formación

Densidad

La densidad del agua de formación depende de la temperatura, presión y los compuestos disueltos. Esta característica es la razón entre la masa del agua de producción y el volumen del agua de la misma. Si el agua de formación tiene valor alto de densidad, puede ocasionar deterioro en la formación o regiones de producción de petróleo (Barba, 2009).

Gravedad Específica

La gravedad específica es una cantidad adimensional que está definida como la razón entre la densidad del agua de formación y la densidad del agua pura a cierta temperatura. Esta gravedad es el índice absoluto de la porción de sólidos disueltos totales en el agua de producción (Barba, 2009).

Viscosidad

Esta propiedad representa la tendencia de oposición al movimiento del agua al aplicar una fuerza. Hay dos clases de viscosidad: la viscosidad cinemática y la viscosidad dinámica. En campo, esta propiedad es medida en centipoise (cp). En el agua de producción que se va a convertir en vapor es deseable que tenga una baja viscosidad debido a que esto ocasiona desgaste en los equipos (Barba, 2009).

3. Generación de vapor

El vapor de agua es el gas que se crea cuando el agua pasa del estado líquido al estado gaseoso cuando el agua alcanza la temperatura de su punto de ebullición. A nivel atómico esta se da cuando las moléculas de H₂O se liberan de las uniones de hidrógeno que hacen que permanezcan unidas. El vapor de agua es invisible, puede ser visto solamente a través de la condensación parcial, donde aparece una especie de niebla (Haddad, 2017).

La producción de vapor se logra con un sistema, que en un conjunto de dispositivos que logran mediante la transferencia de calor que el agua líquida cambie a estado gaseoso y pueda ser usado en las diferentes aplicaciones que abordaremos a lo largo de este trabajo.

Los sistemas de vapor dentro de su disposición poseen una gran cantidad de elementos de operación y control, como se indica en la figura 3.1, dentro de ellos están (Umaña, 2011):

- Calderas
- Controladores de presión y temperatura
- Válvulas de seguridad
- Bomba de alimentación
- Válvulas reguladoras de flujo
- Trampas de vapor
- Taques de condensados
- Sistemas de recuperación de vapor
- Redes de distribución

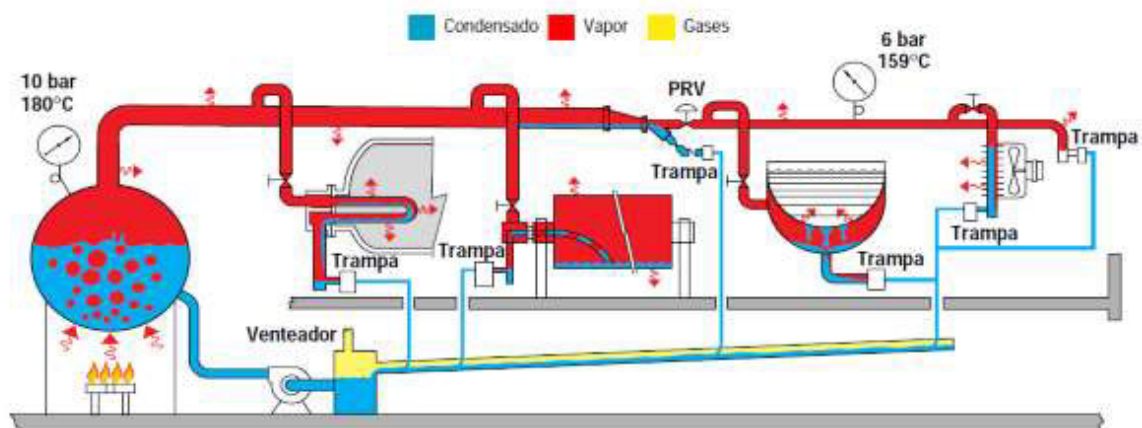


Figura 3.1 Elementos que constituyen un sistema de vapor

Fuente: (Umaña, 2011)

El dispositivo principal de un sistema de vapor lo conforma el generador de vapor o caldera, cuya labor es transmitir al agua la energía en forma de calor de los gases que se produce por la ignición del combustible usado en la caldera, para que pueda transformarse en vapor (Nordelo, 2010).

El generador de vapor de agua se forma por la unión de superficies de calentamiento y dispositivos constituidos en un sistema de tecnología para generar y dar vapor en las cantidades necesarias, respondiendo positivamente a los estándares de calidad, de forma continua y en momento que requieran los equipos de uso final, cuya operación es económica y segura (Nordelo, 2010).

Hoy en día los generadores de vapor se consideran un dispositivo fundamental en proceso de producción de prácticamente la mayoría de empresas al proporcionar el calor o energía necesaria para el procedimiento, dependiendo sus buenos resultados de producción en gran parte de la confiabilidad, seguridad y eficiencia con que operen las calderas (Nordelo, 2010).

Conservar la calidad del vapor en los sistemas está estrechamente conexo con la pureza del vapor, por lo que, hay que tomar el debido cuidado en el tratamiento del agua en la planta de producción, para evitar los siguientes efectos negativos:

- Disminución en la tasa de transferencia de calor, entonces, se tiene menor energía disponible para entregar al dispositivo de generación de vapor.
- Tempranos desperfectos en las válvulas, porque el agua que pasa por las válvulas de control de vapor va a erosionar los elementos internos de las válvulas.
- En el caso de generación de electricidad, disminución del tiempo de vida útil de los mecanismos centrales en las turbinas de vapor.

Los sistemas de vapor habitualmente no se los diseña para que por este circule un fluido adicional. Este líquido adicional puede generar un golpe de martillo de agua o conocido también como golpe de ariete en las tuberías de vapor (Spirax Sarco, 2020).

Es importante también considerar la calidad del vapor, es decir, la cantidad de impurezas permisibles para cada aplicación y esta depende de 4 parámetros:

Comprender la aplicación

La pureza del vapor cambia dependiendo donde se lo vaya a aplicar, es decir, obedece al uso que se le va a dar al vapor. Si es utilizado para transferir a una turbina de generación eléctrica, se deben tener los recaudos necesarios debido a que esta aplicación tiene límites muy estrictos en cuanto a la cantidad de sílice que puede acarrear porque cuando la turbina sobrepasa estos valores, su eficiencia baja notablemente y aumenta su masa (Spirax Sarco, 2020).

Así mismo, en aplicaciones de carácter alimenticio, es esencial mantener la pureza del vapor debido a que se incluyen productos de consumo humano y animal que podrían terminar afectando en su salud. Sin embargo, para la calefacción de edificaciones o en la inyección de vapor en arenas productoras y en el calentamiento del petróleo es de menor importancia.

Los más grandes peligros para garantizar una buena calidad de vapor son el mantenimiento de los equipos y el desconocimiento del funcionamiento y operatividad del sistema. También es muy importante tener en cuenta que los equipos tienen un tiempo de vida útil, lo cual hay que respetar, y además tiene influencia en la calidad del vapor la experiencia de los operadores de las calderas (Spirax Sarco, 2020).

Calidad del agua

Es fundamental mantener la calidad del agua para asegurar la calidad del vapor en aplicaciones industriales. El agua contiene ciertos minerales que pueden ser vistos como impurezas tales como sustancias orgánicas, sales disueltas y sílice; por lo tanto, se debe impedir que esas partículas presentes en el agua se transporten, debido a que seguramente provocarían problemas de corrosión en los equipos (Spirax Sarco, 2020).

Monitorear frecuentemente para conservar la pureza del agua en los parámetros que exige la industria, es transcendental para certificar un trabajo óptimo en el sistema de vapor. El principal instrumento de contaminación del vapor son las gotículas de agua se transmiten con el vapor de la caldera (Spirax Sarco, 2020).

El arrastre de agua son gotitas de agua que se succionan con el vapor en la tubería de salida del generador de vapor. El arrastre en la caldera además de comprometer la pureza del vapor también representa un gran peligro en la seguridad de los sistemas de vapor. Dichas gotitas de agua pueden producir desgaste por erosión de los dispositivos y además reducir la tasa de transferencia de calor y aumentar la humedad en el vapor lo que no es conveniente para la eficiencia del proceso (Spirax Sarco, 2020).

Al momento de agruparse, forman gotas de mayor diámetro y de gran velocidad, las que destruyen cualquier elemento durante el recorrido que realizan, lo cual conlleva a daños irremediables. Otros peligros comprenden ajustar el sistema de control para acoplarse al uso y deterioro natural de los elementos, asimismo las variaciones en el ciclo de trabajo debido a las energías reutilizables que podrían entrar en la red, es decir, que se beneficia de la energía remanente de los gases de escape, la cual a la vez activará la turbina de vapor (Spirax Sarco, 2020).

El diseño de sistema de vapor

La pureza del vapor dependerá básicamente en un óptimo diseño del sistema de vapor, que incluyen al generador de vapor en sí y las tuberías. Cuando la caldera está en su lugar, los tubos por donde recorre el vapor deberán estar aislados y establecer un adecuado espacio para una adecuada purga de los sedimentos en el fondo de la caldera (Spirax Sarco, 2020).

Mantenimiento del sistema de vapor (Spirax Sarco, 2020)

El monitoreo y mantenimientos adecuados pueden aplacar a las posibles amenazas a la calidad del vapor, es por esto que son recomendables las prácticas siguientes:

- Efectuar controles de los dispositivos de instrumentación y control para favorecer a encontrar potenciales debilidades y recomendar las mejorías respectivas.

- Contemplar nuevas tecnologías de control para el mantenimiento predictivo en todo el sistema de vapor.
- Optimizar los sistemas de control automático.
- Capacitar a los operadores con sistemas de simulación.

Procurar dar una buena atención a la pureza del vapor en los sistemas que componen la caldera, facilita a las industrias y servicios públicos establecer un mejor control sobre la tasa de transferencia de calor, optimiza el rendimiento de la caldera y baja el costo total del sistema.

Los problemas asociados a un deficiente tratamiento del agua en las calderas pueden acarrear en los equipos y causar mal funcionamiento o daños en los mismos son: incrustaciones, corrosiones, arrastres y depósitos (Díez, 2012).

Dependiendo de las impurezas que tenga el agua existen varias pruebas que deben realizarse para asegurar que la calidad del agua y del vapor que se obtenga sea el requerido para cada aplicación. Según el *Manual de Calderas de Anthony Kohan* se realiza una descripción de las pruebas que se requieren para el tratamiento del agua que va a alimentar a la caldera generar vapor:

«1. Prueba de acidez o alcalinidad: ésta se utiliza para controlar la corrosión y también la incrustación usando los valores obtenidos al calcular la cantidad de álcali a añadirse a un agua bruta ácida, o la cantidad de cal y sosa que puede necesitarse en un desendurecedor de cal y sosa».

«2. Prueba de dureza, calcio y magnesio: una medida de calcio y magnesio es una medida de la dureza del agua bruta y blanda y del agua de alimentación. La dureza produce incrustación en una caldera y además los valores obtenidos de calcio y magnesio pueden utilizarse para determinar la cantidad de cal y sosa que necesita añadirse al agua de caldera, y así controlar la formación de incrustaciones».

«3. Prueba del hidróxido: la cantidad de hidróxido en el agua de caldera se determina para controlar la corrosión, fragilidad, arrastres o indirectamente el control de incrustación. El hidróxido debe mantenerse a un nivel suficientemente, bajo para que el

arrastre no tenga lugar como formación de espumas y para evitar puntos de concentración de tensiones que ataquen al acero, así como para evitar la fragilidad del acero en zonas muertas de circulación: Las concentraciones de hidróxido se usan también para convertir la dureza que podría formar incrustación en lodos que pueden purgarse fuera de la caldera».

«4. Prueba del fosfato: la concentración de fosfatos se controla para producir incrustaciones solubles que pueden purgarse fuera de la caldera. La concentración de fosfato se mantiene también de modo que exista una relación entre fosfato y pH o alcalinidad en el agua de la caldera, de forma que no haya hidróxido libre presente y así evitar la fragilidad».

«5. Prueba del sulfito. La concentración de sulfito, si está ligeramente en exceso, se combinará con el oxígeno disuelto en el agua y así evitará la corrosión. El tratamiento de sulfito no se recomienda para calderas con presiones por encima de 1.600 psig, porque las reacciones químicas pueden ser peligrosas a presiones más elevadas».

«6. Prueba del hierro: este test se utiliza para determinar si el retorno de condensado tiene exceso de óxido de hierro o herrumbre proveniente de las tuberías anexas y maquinaria de utilización del vapor. El término erosión por partículas sólidas ha venido utilizándose porque la mayoría del hierro está en forma de partículas y no disuelto en agua. Los filtros de membrana son utilizados para aproximar la concentración en el agua».

«7. Prueba del cobre: similar efecto a la del hierro, pero la fuente es normalmente los intercambiadores o equipos de bombeo con piezas de cobre. Las reparaciones que sustituyen el cobre pueden reducir la fuente de este contaminante».

«8. Prueba de conductividad eléctrica: este test determina la cantidad de sólidos presentes en el agua y se utiliza para el control de purga. Si se usa sobre los retornos de condensados, puede utilizarse para detectar fugas de agua bruta de los condensadores e intercambiadores de calor hacia el condensado, instituyéndose así acciones correctivas antes de que se produzcan daños mayores».

Costo de generar vapor.

Para obtener el costo de generar vapor hay que incluir todos los parámetros que forman parte del proceso de generar vapor para las distintas aplicaciones industriales. Los factores que intervienen el costo de generar vapor son (Spirax Sarco, 2020):

- Coste y gasto de combustible.
- Coste y gasto de productos químicos.
- Coste y gasto del agua de reposición o make up.
- Coste y consumo de electricidad.
- Costes operativos y de mantenimiento.

Según lo anteriormente expuesto, el costo de generar vapor de agua se lo puede calcular mediante la ecuación:

$$PV = \frac{h_v - h_{AA}}{PCS * n} * 100 * PC + PQ + A + EE + OM \quad [1]$$

Donde:

PV: Costo del vapor (usd/kg vapor)

h_v : Entalpía del vapor saturado a la presión de trabajo de la caldera (kj/kg)

h_{AA} : Entalpía del agua de alimentación a temperatura ambiente (kj/kg)

PCS: Poder calorífico superior del combustible (kj/kg)

n: Eficiencia de la caldera respecto al PCS (%)

PC: Precio del combustible (usd/kg)

PQ: Precio de los químicos para tratar el agua de alimentación (usd/kg)

A: Costo de consumo de agua (usd/kg)

EE: Costo de consumo de energía eléctrica (usd/kg)

OM: Costo de operación y mantenimiento (USD/kg)

Para una empresa es de suma importancia saber cuánto cuesta generar vapor y como optimizarla porque de eso depende su rentabilidad. Para lograr esto deben tener las siguientes consideraciones:

- Evaluar apropiadamente los aspectos económicos, tanto de proyectos de eficiencia energética y de mejoramiento de la capacidad como de generación de vapor, teniendo en cuenta que si el costo calculado del vapor no es el que corresponde, muchos buenos proyectos de energía pueden perderse o rechazarse, y malos proyectos pueden ser aprobados para su ejecución.
- Servir como una base para optimizar los sistemas de generación de vapor y minimizar los costos asociados.
- Evaluar apropiadamente proyectos de cogeneración.

En este trabajo se realizará un ejemplo de cálculo del costo de generar vapor con todos los costos asociados al mismo.

4. Aplicaciones del vapor en la industria

La energía del vapor constituye una sustancial fuente de energía para la sociedad industrial. El agua se calienta a vapor en las plantas de energía y el vapor presurizado impulsa turbinas que producen corriente eléctrica. La energía térmica del vapor se convierte así en energía mecánica, que a su vez se convierte en electricidad. El vapor utilizado para impulsar los turbogeneradores suministra una gran parte de la electricidad del mundo. El vapor también se emplea ampliamente en procesos industriales como la fabricación de acero, aluminio, cobre y níquel; la producción de químicos; y refinación del petróleo. En el hogar, el vapor se ha utilizado durante mucho tiempo para cocinar y calentar (TVL, 2020).

Varias de las aplicaciones representativas del vapor para distintas industrias son:

- Vapor para calentamiento
 - Vapor de presión positiva

- Vapor al vacío
- Vapor para impulso-movimiento
- Vapor como fluido motriz
- Vapor para atomización
- Vapor para limpieza
- Vapor para hidratación
- Vapor para humidificación

A continuación se describen cada una de estas aplicaciones para luego encajar las aplicaciones en cada una de las diferentes industrias en el país.

Vapor para calentamiento

Vapor de presión positiva

El vapor se produce y distribuye generalmente a una presión positiva. En gran parte de las situaciones, quiere decir, que el vapor de agua se suministra a los dispositivos a presiones más grandes que a 0 MPaG (0 psig) y a temperaturas superiores que 100°C (212°F).

Los usos más frecuentes del vapor a presión positiva los encontramos generalmente en industrias de procesamiento de alimentos, la industria química y refinerías entre otras. El vapor saturado es usado para transferir calor a los fluidos de procesos en intercambiadores de calor, como se muestra en la figura 4.1, reactores, calentadores, pre calentadores de aire de ignición y otra clase de dispositivos de transferencia de calor (TVL, 2020).

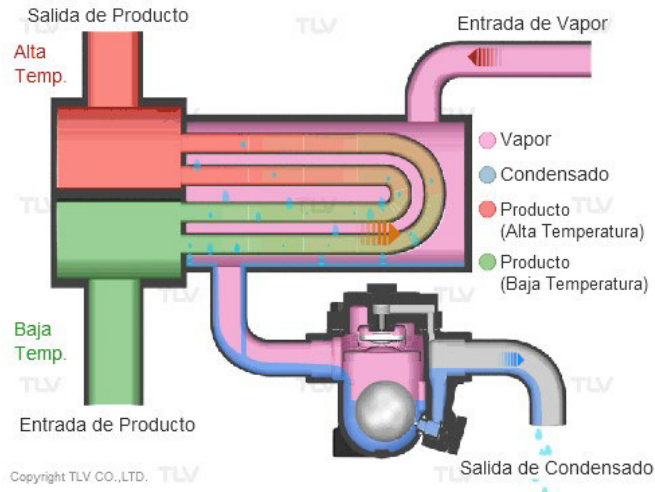


Figura 4.1 Intercambiador de calor de tubos y coraza.

Fuente: (TVL, 2020)

El vapor dentro del intercambiador, sube la temperatura del fluido de interés por transferencia de calor, que luego se transforma en condensado y se lo descarga mediante las trampa de vapor (TVL, 2020).

Otro ejemplo de calor para calentamiento es el horno de vapor mostrado en la figura 4.2. Vapor sobrecalentado entre 200°C y 800°C (392°F y 1472°F) a presión atmosférica es especialmente manejable, y se lo usa en hornos domésticos de vapor (TVL, 2020).



Figura 4.2 Horno de Vapor

Fuente: (TVL, 2020)

Vapor al vacío

Usar vapor a una temperatura menor que el punto de ebullición del agua, sigue creciendo muy rápido a través de los años (TVL, 2020).

Cuando al vapor saturado al vacío se usa de igual manera que al vapor saturado a presión positiva, a la temperatura del vapor de agua se la puede cambiar ajustando la presión, de esta manera se puede monitorear la temperatura de una forma más exacta que otros servicios que utilizan solamente agua caliente. Hay que tener en cuenta sin embargo, se debe usar una bomba de vacío junto con el equipo, ya que se necesitará disminuir la presión menor que la atmosférica (TVL, 2020). Un ejemplo de esta aplicación se muestra en la figura 4.3.

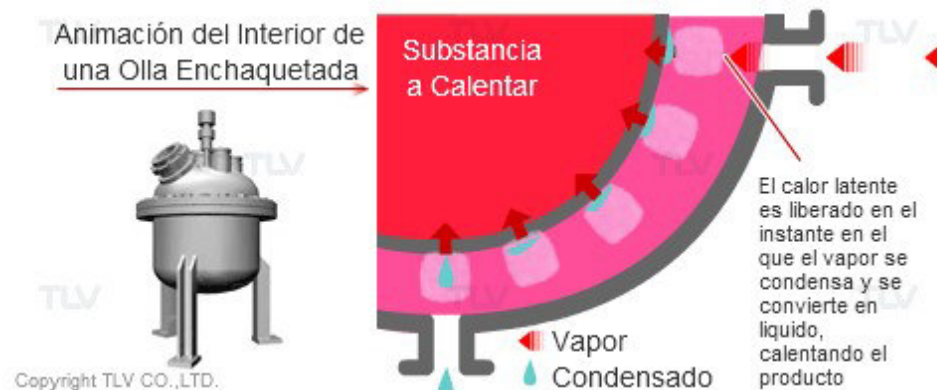


Figura 4.3 Calentamiento con Calor (Vapor) Latente. Olla enchaquetada.

Fuente: (TVL, 2020)

Si se compara con un sistema de calentamiento con agua caliente, este sistema brinda un calentamiento equilibrado, es decir, llega a la temperatura requerida de forma más rápida sin que existan variaciones de temperatura (TVL, 2020).

Vapor para impulso-movimiento

El vapor es usado generalmente para propulsión (como fuerza motriz) en aplicaciones como las turbinas de vapor. La turbina de vapor, como se muestra en la figura 4.4, es un

dispositivo fundamental para generar energía eléctrica en la industria termoeléctrica. Para hacer mejoras en la eficiencia, se ha hecho adelantos encaminados al empleo del vapor a presiones y temperaturas mucho mayores. Hay varias industrias termoeléctricas que usan vapor sobrecalentado a 25 megapascales absolutos (3625 psia), a 610°C (1130°F), presión crítica en las turbinas (TVL, 2020).

Para la prevención de daños en los dispositivos a causa de los condensados, habitualmente se usa vapor sobrecalentado. No obstante, en algunas plantas nucleares, se evita usar vapor a muy altas temperaturas ya que podría causar deterioros en el material que se usa en turbinas, por eso se prefiere usar vapor saturado a alta presión. Cuando el vapor saturado es usado, habitualmente se instalan separadores en la tubería de abastecimiento de vapor para quitar el condensado del flujo de vapor (TVL, 2020).

A más la generación de electricidad, otros usos frecuentes de impulso-movimiento son los compresores accionados por turbinas o las bombas, compresor de gas, bombas para las torres de enfriamiento.

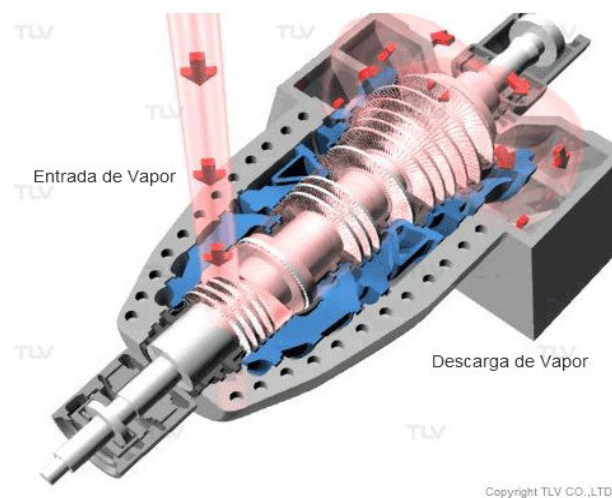


Figura 4.4 Turbina de Vapor

Fuente: (TVL, 2020)

La fuerza motriz del vapor causa que los alabes se muevan, lo que produce la rotación del rotor que se encuentra conectado al generador de energía, este proceso origina la energía eléctrica.

Vapor como fluido motriz

El vapor también es utilizado como fuerza motriz para el movimiento de fluidos en tuberías. Los eyectores de vapor, como se muestra en la figura 4.5, pueden ser utilizados para generar vacío en dispositivos de procesos como torres de destilación que son usadas para separar y purificar fluidos de procesos. Además estos eyectores son usados también para remover continuamente el aire de los condensadores de superficie, para sostener la presión de vacío requerida en turbinas de condensación (TVL, 2020).

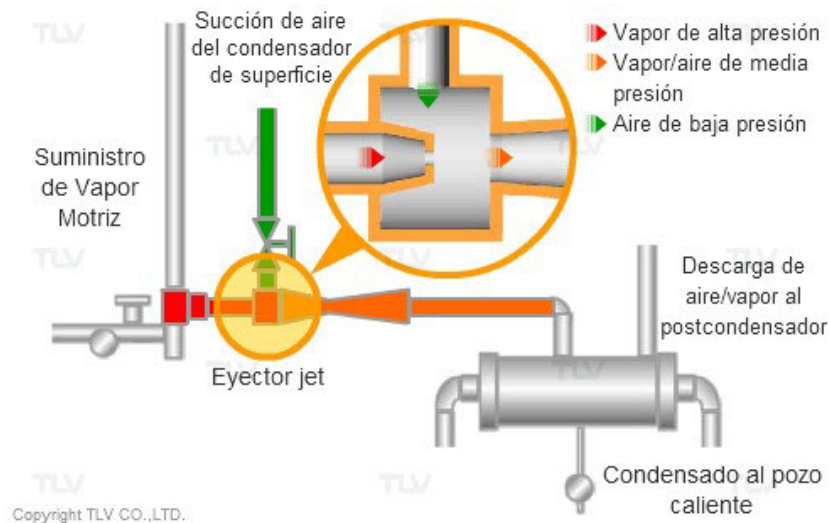


Figura 4.5 Eyector de vapor para condensador de superficie.

Fuente: (TVL, 2020)

El vapor a alta presión entra al eyector por la tobera de ingreso y se distribuye, este proceso produce una zona de menor presión, la misma que lleva aire del condensador de superficie.

En otro tipo de servicio, el vapor además es usado como fluido motriz principal para los drenadores de presión secundaria, los mismos que se usan para bombear condensado hacia los tanques receptores, tanques de flasheo o dispositivos de vapor que han experimentado condiciones de Stall (inundación) (TVL, 2020).

Vapor para atomización

El vapor atomizado se usa generalmente para disociar un fluido mecánicamente. Por ejemplo, en ciertos quemadores, como se muestra en la figura 4.6, al inyectar vapor en el combustible se optimiza la eficiencia de la ignición y se reduce la obtención de hollín. En los generadores de vapor y calderas cuyo combustible es petróleo pueden utilizar este procedimiento para fraccionar el carburante en minúsculas gotitas para así tener una ignición más eficiente. Además los quemadores usarán la atomización para disminuir contaminantes en el final del proceso (TVL, 2020).

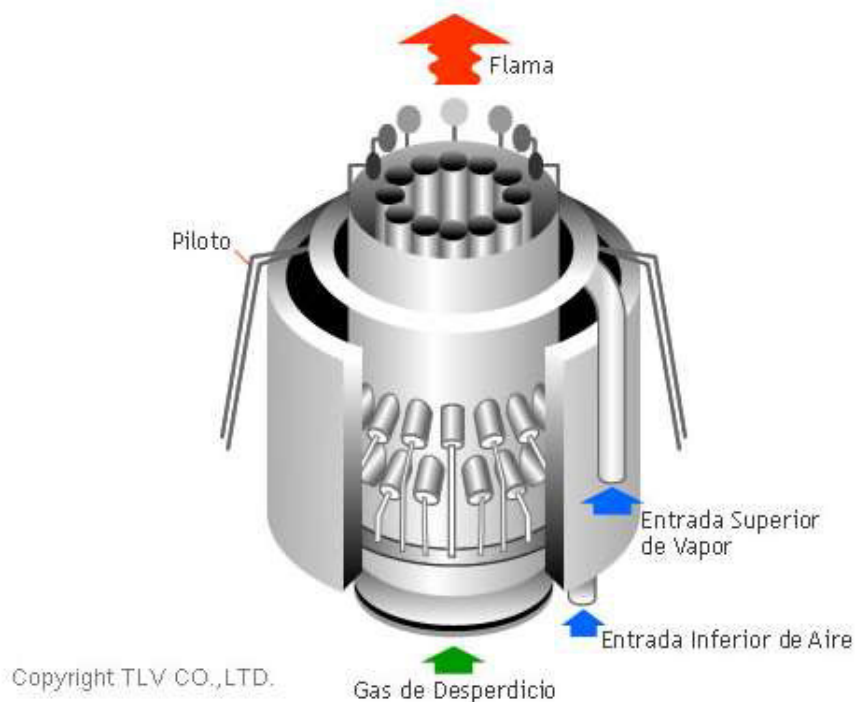


Figura 4.6 Quemador asistido por vapor.

Fuente: (TVL, 2020)

En algunos quemadores, habitualmente al vapor de agua de lo mezcla con el gas residual antes de la combustión.

Vapor para limpieza

El vapor se lo utiliza para sanear una amplia clase de superficies. Por ejemplo los sopladores de hollín, como se muestra en la figura 4.7. Los generadores de vapor o

calderas que utilizan petróleo o carbón como combustible, están provistas con estos sopladores de hollín para el saneamiento alrededor del horno y quitar las incrustaciones producto de la combustión de las superficies de convección y de esa manera tratar de mantener la confiabilidad y eficiencia de la caldera (TVL, 2020).

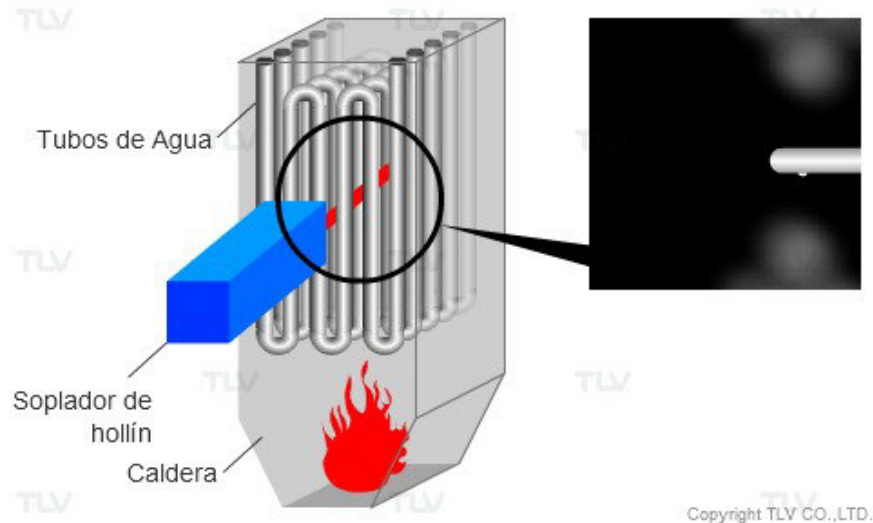


Figura 4.7 Limpieza de la caldera con sopladores de hollín.

Fuente: (TVL, 2020)

El vapor descargado afuera de la tobera del soprador de hollín expulsa la ceniza e impurezas, que cae en las tolvas o es acarreado y desalojado con los gases de ignición.

Vapor para hidratación

En ciertas ocasiones el vapor se utiliza para hidratar el proceso a la vez que se suministra el calor necesario para el mismo. Por ejemplo, en la producción de papel. El papel es movido a gran velocidad en grandes rollos, para que no tenga rupturas a nivel microscópico se lo hidrata con vapor. Otro ejemplo son los molinos que producen comida para animales, como se muestra en la figura 4.8. De manera continua estos molinos, usan inyección directa de vapor de agua para calentar e hidratar el alimento (TVL, 2020).

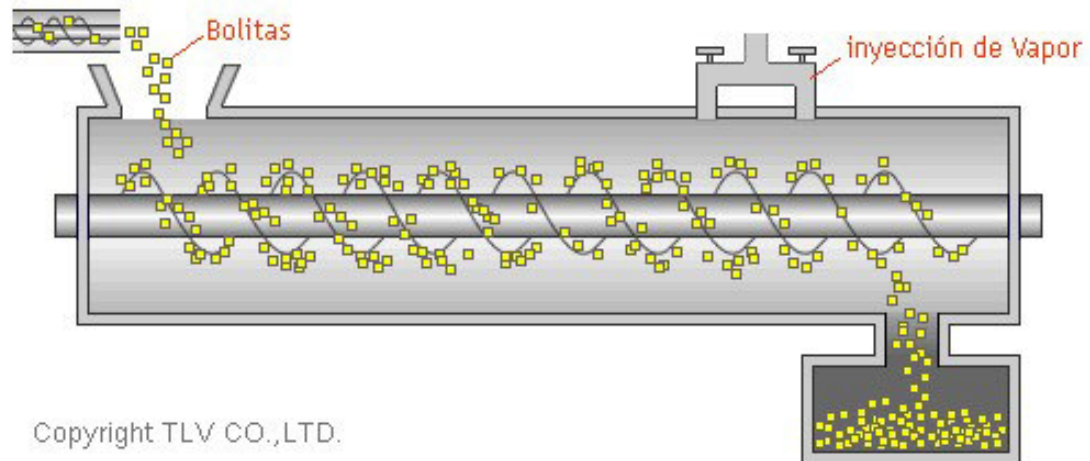


Figura 4.8 Molino hidratador de alimento para animales

Fuente: (TVL, 2020)

La hidratación suaviza al alimento y gelatiniza en parte al almidón que contiene los ingredientes lo que resulta en bolitas de alimento muy compactas.

Vapor para humidificación

En extensas edificaciones comerciales e industriales en climas muy fríos, usan vapor saturado a baja presión para elevar la temperatura interna. Las bobinas HVAC, habitualmente integradas con humidificadores de vapor, como se muestran en la figura 4.9, es el equipo que se usa para el acondicionamiento del aire, para comodidad interior, conservación de registros y libros, y controlar infecciones. Cuando el aire frío es calentado, pasa por la bobinas de vapor la humedad relativa del aire hace que se produzca un goteo y entonces, se debe ajustar dentro de los márgenes aceptables en adición a una inyección controlada de vapor seco saturado en la línea inferior de flujo de aire (TVL, 2020).

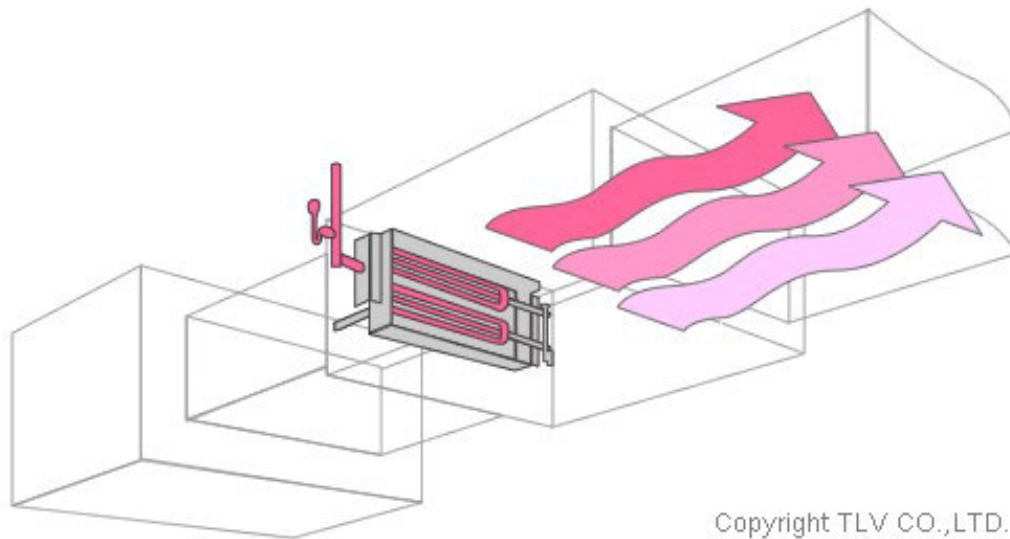


Figura 4.9 Humidificador de vapor.

Fuente: (TVL, 2020)

El vapor se usa para dar humedad al aire en el interior de un conducto previo a ser repartido a otras zonas de una edificación.

Vapor de calidad sanitaria / Vapor limpio

El vapor limpio, es decir, de uso sanitario, es cada vez más demandado por la industria farmacéutica para distintas aplicaciones. Cuando el vapor va a entrar en contacto con el producto, entonces el agua que va a ser transformada en vapor necesita una altísima calidad, y para conseguir ese objetivo se requieren materiales de extraordinaria calidad en los sistemas de producción y conducción de vapor (Fisair, 2016).

En los casos en que el vapor sea usado para climatizar y como fluido calo portador de diferentes procedimientos, se ha demostrado por la práctica aplicada en la industria que la solución más óptima puede solicitar el intercambio de vapor en el generador de vapor con agua de buenas características sanitarias. Dichos procesos utilizados en conjunto con procesos de dispersión de vapor apropiados dan un gran aval de pureza en el vapor, que, a diferencia de un distinto procedimiento, brinda seguridad en las potenciales condensaciones de los canales de aire (Fisair, 2016).

5. Potenciales usos en la industria petrolera

El vapor de agua tiene varios usos muy importantes de dentro de la industria del petróleo tales como:

- Generación de electricidad (turbinas de vapor)
- Recuperación Térmica
- Inyección de Vapor
- Tratamiento térmico para deshidratación de petróleo
- Vapor como fluido motriz
- Vapor para atomización
- Vapor para limpieza

Generación de Electricidad (Turbinas de Vapor).

Las turbinas son una clase de turbomáquinas activadas por la fuerza que se aplica en el rotor un fluido en circulación, en esta ocasión, el fluido es el vapor. Este dispositivo tiene un rotor con eje, integrado por planos de anillos en cuyos bordes están los alabes, que propulsan al disco que está unida a un eje principal. La turbina de vapor activa un generador del cual se obtiene electricidad que luego es transmitida por líneas de transporte de energía eléctrica (Lostaunau, 2007).

Estas turbomáquinas requieren de un vapor de alta calidad, es decir, que cumpla mínimos valores aceptados de impurezas para lograr alargar la vida útil de la turbina, reducir tiempos por mantenimientos no programados y mantener su rendimiento o eficiencia en valores óptimos de funcionamiento.

Para mantener una buena calidad de vapor en la turbina es necesario realizar el tratamiento al agua que ingresa en la caldera que va a producir el vapor, en este caso, se realizará un análisis del agua de formación y conocer si esta agua, materia prima del vapor, cumple los parámetros deseados para el buen funcionamiento de la turbina.

Para empezar se ha tomado como ejemplo, el agua de formación del Pozo 23 (Sac-23) de la estación norte 1 del campo Sacha que se indican en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Análisis fisicoquímico del agua de formación del pozo re-inyector SAC-23

ANÁLISIS FISICOQUIMICO DEL POZO REINYECTOR SAC-23		
ANÁLISIS	Unidades	ESTACION NORTE 1
		Reiny-23
Dureza Total	ppm CaCO ₃	1040.0
Dureza cálcica	ppm CaCO ₃	860.0
Dureza Magnésica	ppm CaCO ₃	180.0
Alcalinidad	ppm CaCO ₃	560.0
Calcio	ppm Ca ⁺⁺	344.0
Magnesio	ppm Mg ⁺⁺	43.2
Bicarbonatos	ppm CaCO ₃	694.4
Hierro	ppm Fe total	5.10
Sulfatos	ppm SO ₄ ⁼	3.0
Cloruros	ppm Cl ⁻	5000
pH		7.2
Temperatura	°F	114.8
H ₂ S en agua	ppm	0.3

Fuente: (Landazuri, 2015)

Los principales contaminantes en el vapor de las turbinas y sus efectos se muestran en la tabla 5.2

Tabla 5.2 Los principales contaminantes en el vapor de las turbinas y sus efectos

Contaminante	Origen	Efecto
Cloruro de sodio (NaCl)	Fuga en el circuito de refrigeración principal hacia el vapor	Corrosión
Oxígeno (O ₂)	Fuga de vacío en el condensador Mal funcionamiento del desgasificador Dosificación inadecuada del secuestrante de O ₂	Corrosión
Sulfato y Carbonato de Calcio y Magnesio (CaSO ₄ , MnSO ₄ , CaCO ₃ , MnCO ₃)	Fuga en el circuito de refrigeración principal hacia el vapor	Incrustaciones
Sílice	Funcionamiento incorrecto de la planta de desmineralización del agua de aporte. Régimen de purgas inadecuado.	Incrustaciones en álabes de turbinas de vapor. Erosión en álabes
Fluoruros (F ⁻)	Soldaduras en trabajos de mantenimiento	Corrosión
Aceite	Cojinetes de turbina de vapor	Ensuciamiento de elementos de transferencia de calor
Ácidos Orgánicos	Agua de aporte. Mal funcionamiento de la planta desmineralizadora	Corrosión

Fuente: (Jiménez, 1997)

Los rangos esperados y los valores límite para asegurar la calidad del vapor dentro de la turbina se muestran en la tabla 5.3

Tabla 5.3 Rangos esperados y valores límite para asegurar la calidad dentro de la turbina

Parámetro	Rango Esperado	Valor Límite	Actuación		
			en 1 semana	Actuación en 24 horas	Actuación en 1 hora
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$, 25°C)	0,06 -0,2	$\leq 0,2$ ^(a,b)	0,02-0,5 ^(c)	0,5 - 1,0	$\geq 1,0$
Sodio (Na) (ppm)	0 – 0,005 ^(c)	$\leq 0,005$ ^(c)	-	-	-
Sílice (SiO ₂) (ppm)	0,003 – 0,005	$\leq 0,020$	-	-	-
Hierro (Fe) ^d (ppm)	0,002 – 0,005	$\leq 0,020$	-	-	-
Cobre (Cu) ^e (ppm)	0 – 0,001	$\leq 0,003$	-	-	-

Fuente: (Jiménez, 1997)

^a Para una dosificación convencional de fosfato, se puede aplicar un valor límite de 0,3 $\mu\text{S/cm}$, lo que mostraría que la conductividad dominante es debida al ion fosfato.

^b Puede ser aceptable un mayor valor cuando se utiliza un barredor orgánico de oxígeno o un acondicionador volátil de pH. Esto demuestra por ejemplo mediante un análisis de cloruros y sulfatos, que el crecimiento de la conductividad no es debido a agentes agresivos.

^c Si los contenidos de cloruros son mayores a 20 $\mu\text{g/kg}$, es necesario actuar dentro de las 24 horas.

^d Puede no ser necesario su monitoreo en todos los casos.

^e Solamente se debe monitorear en plantas con intercambiadores de calor de tubos de aleación de cobre (particularmente en sistemas de generador de vapor de alta presión).

El agua de alimentación, es decir la materia prima para generar vapor también debe cumplir ciertos estándares para evitar una serie de daños en la caldera que es el equipo

que va a transformar el agua de formación en vapor. A continuación se detalla en la tabla 5.4 los valores mínimos aceptados de impurezas avalados por el comité investigador de ASME Manufacturers Association Manual, para el agua de alimentación y el agua de calderas, a diferentes presiones de trabajo.

Tabla 5.4 Valores límites de impurezas recomendados por el comité investigador de ASME para el agua de alimentación y el agua de calderas, para calderas a diferentes presiones de trabajo.

Agua de Caldera				Agua de alimentación			
Presión de caldera, psig	Sólidos totales, ppm ¹	Alcalinidad total, ppm como CaCO ₃ ¹	Sílice, ppm como SiO ₂ ²	Dureza, ppm como CaCO ₃	Hierro, ppm como Fe	Cobre, ppm como Cu	Oxígeno, ppm como O ₂
0 - 300	3.500	700	75 - 50	0 - 1 Máx.	0,10	0,05	0,007
301 - 450	3.000	600	50 - 40	0 - 1 Máx.	0,10	0,05	0,007
451 - 600	2.500	500	45 - 35	0 - 1 Máx.	0,10	0,05	0,007
601 - 750	2.000	400	35 - 25	0 - 1 Máx.	0,05	0,03	0,007
751 - 900	1.500	300	20 - 8	0 - 1 Máx.	0,05	0,03	0,007
901 - 1.000	1.250	250	10 - 5	0 - 1 Máx.	0,05	0,03	0,007
1.001 - 1.500	1.000	200	5 - 2	0	0,01	0,005	0,007
1.501 - 2000	750	150	3 - 0,8	0	0,01	0,005	0,007
2.001 - 2.500	500 ⁴	100 ⁴	0,4 - 0,2	0	0,01	0,005	0,007
2.501 - 3000	500 ⁴	100 ⁴	0,2 - 0,1	0	0,01	0,005	0,007

Fuente: (Kohan, 2000)

«Nota: La materia orgánica del agua de alimentación debería ser cero y el pH, en el rango de 8,0 a 9,5³». «»

1. «American Boiler Manufacturers Association Manual».

2. «Por encima de 600 psig, el nivel de sílice seleccionado para producir vapor con 0,02 ppm de SiO₂».
3. «Publicaciones de Babcock & Wilcox: (a) Tratamiento de agua para calderas industriales, BR-884, 8-68; y (b) J.A. Lux», «Control de calidad del agua de calderas en la planta de vapor de alta presión, 9/62».
4. «J.A. Lux recomienda niveles tan bajos como 15 ppm de sólidos totales disueltos por encima de 2000 psig».

El tratamiento de agua sugerido para que el vapor tenga la calidad necesaria para realizar esta aplicación se describe a continuación en la tabla 5.5

Tabla 5.5 Productos químicos y su empleo en el tratamiento de aguas para vapor.

Producto Químico	Propósito	Comentario
Hidróxido sódico NaOH (sosa cáustica)	Aumenta la alcalinidad, eleva el pH y precipita al magnesio.	No contiene carbonato, no promueve la formación de CO ₂ en el vapor.
Carbonato sódico Na ₂ CO ₃ (cenizas de sosa)	Aumenta la alcalinidad, eleva el pH y precipita el sulfato cálcico como carbonato.	Menor coste y manejo más fácil que la sosa cáustica, pero algún carbonato se descompone desprendiendo CO ₂ con el vapor.
Fosfato sódico NaH ₂ PO ₄ , Na ₂ HPO ₄ , Na ₃ PO ₄ , NaPO ₃	Precipita el calcio como hidroxiapatito [Ca ₁₀ (OH) ₂ (PO ₄) ₆]	La alcalinidad y el pH resultante deben mantenerse elevados lo suficiente para que esta

Producto Químico	Propósito	Comentario
Aluminato sódico NaAl ₂ O ₄	Precipita el calcio y el magnesio	reacción tenga lugar (pH normalmente por encima de 10,5) Forma lodo floculante
Sulfito sódico Na ₂ SO ₃	Evita la corrosión por oxígeno	Usado para neutralizar el oxígeno residual formando sulfato sódico. A altas temperaturas y presiones, el exceso puede formar H ₂ S en el vapor
Hidrato de hidrazina N ₂ H ₄ •H ₂ O en solución al 35%	Evita la corrosión por oxígeno	Elimina el oxígeno residual para formar nitrógeno y agua. Una parte del oxígeno reacciona con tres partes de hidrazina (35% en solución)
Aminas filmógenas Octadecilamina.	Control de la corrosión en la línea de retorno al formar una capa protectora sobre la superficie del metal	Protege contra el ataque de oxígeno y dióxido de carbono. Pequeñas cantidades en la alimentación continua mantendrán la capa protectora.

Producto Químico	Propósito	Comentario
Aminas neutras, morfolina, ciclohexilamina, bencilamina.	Control de la corrosión en la línea de retorno por neutralización de CO ₂ y ajuste del pH condensado.	Se necesitan aproximadamente 2 ppm por cada ppm de dióxido de carbono en el vapor. Mantener el pH en el rango de 7,0 a 7,4 o mayor.
Taninos, almidones, glucosa y derivados de la lignina.	Evita que se deposite la capa de incrustaciones cristalinas en la línea de alimentación para que se produzcan lodos fluidos que no se adhieran tan fácilmente a las superficies calefactoras de la caldera.	Estos productos orgánicos, a menudo llamados coloides protectores, se usan con carbonato sódico y fosfatos. También distorsionan el crecimiento de los cristales y ayudan a inhibir la fragilidad cáustica.
Nitrato sódico NaNO ₃	Inhibe la fragilidad cáustica.	Utilizado cuando el agua puede tener
Derivados de algas (Alginatos de sodio, manuronato sódico)	Proporcionan un lodo más fluido y minimizan arrastres	Características de fragilidad. Productos orgánicos clasificados como coloides reactivos ya que

Producto Químico	Propósito	Comentario
		reaccionan con el calcio y el magnesio y absorben los cristales de incrustación.
Antiespumantes (poliamidas)	Reducen la tendencia a formar espumas del agua altamente concentrada de la entrada de las calderas.	Usualmente añadidos con otros productos químicos para control de incrustación y dispersión de lodos.

Fuente: (Kohan, 2000)

Recuperación Térmica

Cuando los métodos tradicionales de recuperación de petróleo han declinado la extracción, se recurre a otras técnicas para sacar el crudo con mayor viscosidad bajo tierra y así incrementar la producción. En dichos procedimientos, el vapor se inyecta en pozos inyectoros con el fin de mover el petróleo y tener producción en otros pozos. La presión que se requiere para sostener la inyección del fluido aumenta además las fuerzas de empuje en el yacimiento, reduce la resistencia a fluir que tiene el crudo, aumentando así la movilidad de crudo (Aragón, 2017).

Inyección de vapor

Es el procedimiento térmico más usado industrialmente, en la que la energía que se necesita para reducir la viscosidad es provista por el calor que le da al yacimiento (Aragón, 2017).

Hay dos tipos de inyección de vapor:

- Inyección Continua de Vapor a un pozo para incrementar la producción en pozos vecinos
- Inyección Alternada de Vapor a un pozo productor logrando su estimulación.

Estas dos técnicas consisten en inyectar vapor en el interior de la formación. (Aragón, 2017)

Hay muchos reservorios, generalmente poco profundos, que contienen petróleo que es demasiado viscoso para producirse bien. Sin embargo, mediante la aplicación de calor, es posible la recuperación económica de estos depósitos. Los crudos pesados, que pueden tener una viscosidad de hasta un millón de veces la del agua, mostrarán una reducción de la viscosidad en un factor de 10 por cada aumento de temperatura de 50 ° C (90 ° F). La forma más eficaz de elevar la temperatura de un depósito es mediante la inyección de vapor. En el método más extendido, llamado inyección cíclica, se inyecta una cantidad de vapor a través de un pozo en una formación y se deja tiempo para que se condense. La condensación en el depósito libera el calor de vaporización que se requirió para crear el vapor. Luego, el mismo pozo se pone en producción. Después de cierta producción de agua, el aceite calentado fluye hacia el pozo y se eleva a la superficie. A menudo, el ciclo se puede repetir varias veces en el mismo pozo. Un método menos común implica la inyección de vapor de un grupo de pozos, mientras que el petróleo se produce continuamente en otros pozos.

La inyección continua de vapor calienta una porción más grande del depósito y logra las recuperaciones de petróleo pesado más eficientes. Esta técnica, conocida como inundación con vapor, es un proceso de desplazamiento similar a la inundación con agua. El vapor se bombea a los pozos de inyección, que en algunos casos se fracturan artificialmente para aumentar la permeabilidad del yacimiento, y el petróleo se desplaza a los pozos de producción. Debido al costo relativamente alto del vapor, a veces se inyecta agua en un momento óptimo para empujar el vapor hacia los pozos de producción. Debido a que el vapor tiene dos funciones, el calentamiento y el transporte del aceite, algo de vapor siempre debe circular a través de la formación rocosa sin condensarse. Incluso en algunos de los yacimientos más favorables, es necesario consumir una cantidad de energía equivalente a quemar aproximadamente del 25 al 35 por ciento del petróleo pesado producido para generar la cantidad requerida de vapor.

Tratamiento del agua.

Con respecto al tratamiento de agua para calderas, se han realizado altos estudios para el desarrollo e implementación de compuestos inorgánicos así como: aminos, sulfitos, aminos, en otros, no obstante estos elementos actúan únicamente para prevención, es decir, cuando la caldera ya tiene incrustaciones, dichos compuestos podrán evitar que estas incrustaciones sigan proliferando, sin embargo la incrustación que ya estaba formada no tendrá disminución alguna pero podrían hacerlo si la dosificación es incorrecta. Por lo tanto, la remoción de incrustaciones se tendrá que realizar manualmente o por medio de aplicación de ácido, teniendo mucho cuidado con el monitoreo de los valores de pH, dureza, alcalinidad y otros estándares recomendados por el proveedor de productos químicos para el tratar el agua dentro de la caldera. Entonces el agua para la generar del vapor tendría que tener valores de dureza cercanos a cero, levemente alcalina, sin oxígeno, sólidos, petróleo, H₂S y hierro disuelto.

A continuación se presenta en la tabla 5.6 los valores del análisis fisicoquímico del agua de formación del campo Edén Yuturi donde se producen aproximadamente 350 bwpd.

Tabla 5.6 Análisis fisicoquímico del agua de formación Edén Yuturi.

Componente	Unidad	Valor
Sodio	ppm	4,98
Magnesio	ppm	40,8
calcio	ppm	224
Bario	ppm	2

Componente	Unidad	Valor
Hierro	ppm	3,15
Cloruros	ppm	6,7
Sulfato	ppm	180
Bicarbonatos		1,39
Acidocarboxilicos	ppm	1111
Sólidos disueltos	ppm	14,5
Densidad	g/l	1,009
H ₂ S en agua	ppm	0,014
Aceite en agua	ppm	49
Residual de inhibidor de escala	ppm	14
Oxígeno disuelto	ppb	20
Sup. pH	pH	6,13
Sólidos totales suspendido	ppm	31
Turbidez	NTU	26

Fuente: (Fassler, 2016)

Si se realiza el análisis con la tabla 5.4 y se puede observar que se debe hacer un tratamiento para reducir los valores de hierro, y oxígeno, mientras que el valor del pH debería ser aumentando hasta un rango de 8 a 9,5.

Tratamiento térmico para deshidratación de petróleo

El tratamiento térmico instituye una técnica efectiva y económica para deshidratar el petróleo y en mucho de los procesos se usa en otros procedimientos. La aplicación de calor para romper la emulsión se puede realizar con calentadores indirectos (intercambiadores de calor) (Chavez, 2010). Los intercambiadores de calor son equipos

que desempeñan una tarea determinada, intercambiar calor sin que los fluidos lleguen a mezclarse. En la industria petrolera, el intercambiador de calor más recurrente es el tubo y coraza, ya que por el gran rango de servicio y gran resistencia a diferentes situaciones operativas (Chavez, 2010).

Para esta clase de aplicación se ha tomado los datos físico-químicos del agua de formación del Campo Palo Azul que indican en la tabla 5.7.

Tabla 5.7 Análisis físico-químico del agua de formación Campo Palo Azul.

Nombre	Unidad	PLAB-03
Calcio [Ca ⁺⁺]	ppm	976,0
Magnesio [Mg ⁺⁺]	ppm	132,0
Bario [Ba ⁺⁺]	ppm	27,0
Estroncio [Sr ⁺⁺]	ppm	0,0
Sodio [Na ⁺]	ppm	2043,0
Cloruro [Cl ⁻]	ppm	4850,0
CO ₂ gaseoso	%	60,0
Temperatura de cabeza	°F	198,0
Presión de cabeza	psi	153,0
Temperatura de fondo	°F	201,0
Producción de Petróleo	BPPD	616,93
Producción de Agua	BAPD	2467,9
Producción de Gas	MMSCF	0,434
Profundidad	ft	10404,0

Fuente: (Sevillano, 2016)

Tratamiento del agua

Para que el agua pueda ser transformada en vapor y utilizados intercambiadores de calor indirectos se debe realizar un tratamiento para reducir la dureza total que es la composición de la dureza magnésica y dureza cálcica. En esta muestra de agua hay que tomar en cuenta que se debe reducir los valores de sodio a valores menores de 0,005 ppm según la tabla 5.3 para evitar problemas de corrosión. Con respecto al pH aunque no existen valores en el análisis se debe recordar que se debe mantener el rango de 8,0 a 9,5

Vapor como Fluido motriz

El vapor también es utilizado como fuerza motriz para el movimiento de fluidos en tuberías. Los eyectores de vapor, como se muestra en la figura 4.5, pueden ser utilizados para producir vacío en dispositivos de procesos como las torres de destilación que son usadas para separar y purificar flujos de procesos. Además estos eyectores son usados también para remover continuamente el aire en condensadores de superficie, para conservar la presión de vacío requerida en turbinas de condensación (TVL, 2020).

La tecnología del eyector de vapor se aplica a todos los sectores de la industria de procesos, desde unidades de destilación de vacío (VDU) de la enorme capacidad para refinerías, hasta modelos sencillos de una etapa para evacuación de reactores en la fabricación química. Las aplicaciones más frecuentes de los eyectores son (EDWARDS, 2016):


- Sistemas de vacío de refinerías
- Unidades de destilación al vacío
- Evaporadores flash para la desalinización del agua de mar
- Procesamientos del aceite comestible
- Polimerización
- Cristalización
- Enfriamiento por evaporación

- Deseccación de aceites combustibles
- Evacuación de reactores químicos

Tratamiento de agua

Para esta aplicación se ha tomado el análisis fisicoquímico del agua de formación de la Estación Guanta que produce 2785 BAPD los cuales se indican en la tabla 5.8

Tabla 5.8 Análisis físico-químico del agua de formación en la Estación Guanta.

INTEROC S.A. CUSTER INTERNACIONAL		CUSTER 	
Amazonas 40-80 y Unión Nacional de Periodistas. Edificio Puerta del Sol. Of. 101-103 Teléfonos (5932) 2261446-50 Fax (5932) 2261453			
ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO REINYECCION			
Campo	GUANTA		
Locación	UNIDAD	WASH TANK	POZO GUANTA 07
Alkalinity	(mg/l)	450	420
Hardness Total	(mg/l)	19900	19750
Hardness Calcium	(mg/l)	16500	16400
Hardness Magnesium	(mg/l)	3300	3350
Magnesium, Mg ²⁺	(mg/l)	802	814
Calcium, Ca ²⁺	(mg/l)	6640	6560
Manganese, Mn ²⁺	(mg/l)	0	0
Total Iron	(mg/l)	70.0	90.0
Chloride, Cl ⁻	(mg/l)	43850	42500
Sulfate, SO ₄ ²⁻	(mg/l)	50	120
Bicarbonate	(mg/l HCO ₃)	549	512
NTU	FAU	81	94
Total Dissolved Solids	(mg/l)*	90	120
Known pH	---	6.53	6.4
CO ₂ Dissolved in Brine	(mg/l)	110	110
H ₂ S Dissolved in Brine	(mg/l)	5	4
Oil in Brine	(ppm)	15.29	17.90
Oxygen Dissolved	(ppb)	0	0
Calculated pH	---	6.2	6.3
Temperature	(°F)	110	104
Pressure	(psia)	18	1650
Saturation Index	SI	1.9	1.7
Tendency		INCRUSTANT	INCRUSTANT

Fuente: (Ramos, 2014)

En este caso, para que el agua sirva para alimentar a la caldera y generar vapor se deberá reducir la dureza total ya que el informe de la empresa señala que la tendencia de esta agua de producción es de formar incrustaciones, el contenido de hierro y un aumento en pH en el agua.

Vapor para atomización

El vapor atomizado se usa generalmente para disociar un fluido mecánicamente. Por ejemplo, en ciertos quemadores, como se muestra en la figura 4.6, al inyectar vapor en el combustible se optimiza la eficiencia de la ignición y se reduce la obtención de hollín. En los generadores de vapor y calderas cuyo combustible es petróleo pueden utilizar este procedimiento para fraccionar el carburante en minúsculas gotitas para así tener una ignición más eficiente. Además los quemadores usarán la atomización para disminuir contaminantes en el final del proceso (TVL, 2020).

Para esta verificar si el agua de formación sirve para esta aplicación se han tomado los valores del análisis fisicoquímico del agua de formación del Campo Shushufindi que se indican a continuación en la tabla 5.9.

Tabla 5.9 Análisis fisicoquímico del agua de formación del Campo Shushufindi.

Parámetro	Unidad	Valor
pH		7
Temperatura	°F	126
Turbidez	NTU	60
Dureza total	ppm CaCO ₃	3300
Dureza cálcica	ppm CaCO ₃	2700

Parámetro	Unidad	Valor
Dureza magnésica	ppm CaCO ₃	600
Alcalinidad	ppm CaCO ₃	930
Sulfatos	ppm SO ₄ ⁻⁻	140
SDT	ppm	122,78
Cloruros	ppm Cl -	13400
Tendencia		INCRUSTANTE

Fuente: (Miranda, 2016)

Tratamiento de agua

Para que esta aplicación sea posible es necesario que se realice previamente un tratamiento para reducir la dureza total, según la presión de la caldera también reducir la alcalinidad y el valor de los cloruros. Además es necesario realizar un tratamiento para elevar el pH.

Vapor para limpieza

Otras aplicaciones del vapor en la limpieza en la industria petrolera son: Desparafinado de tubing, limpieza de tanques, herramientas y equipos, limpieza de piscinas, limpieza exterior e interior de tuberías en general. En la industria petrolera argentina la empresa Green Oil Services (GOS) ha desarrollado un equipo para realizar este tipo de limpieza industrial. El equipo HWOS (Hot Water Oil Steam), está compuesto por una caldera para generación de vapor, una caldera para calentamiento de agua o petróleo, una planta para tratar el agua, un generador de electricidad, un sistema para dosificar compuestos químicos, una bomba alterna para caudal y presión, un tanque cisterna, tuberías para conducir el agua y vapor y la cabina de monitoreo (Green Oil Services, 2017).

Tratamiento de agua

Para esta aplicación se usará como ejemplo el análisis fisicoquímico del agua de formación de la estación central del Campo Sacha los cuales se indican en la tabla 5.10.

Tabla 5.10 Análisis fisicoquímico del agua de formación de la estación central del Campo Sacha.

ANALISIS	Unidades	ESTACION CENTRAL	
		Tanque de lavado	Reinyector 86
Dureza Total	ppm CaCO ₃	1200	1190
Dureza cálcica	ppm CaCO ₃	1010	995
Dureza Magnesica	ppm CaCO ₃	190	195
Alcalinidad	ppm CaCO ₃	358	380
Calcio	ppm Ca ⁺⁺	404	398
Magnesio	ppm Mg ⁺⁺	45,6	46,8
Bicarbonatos	ppm CaCO ₃	443,9	471,2
Hierro	ppm Fe total	2,25	3
Sulfatos	ppm SO ₄ ⁼	5	10
Cloruros	ppm Cl ⁻	7550	7700
pH		6,8	6,9

ANALISIS	Unidades	ESTACION CENTRAL	
		Tanque de lavado	<u>Reinyector</u> 86
Temperatura	°F	113,7	110,4
CO2 gas	%	2	2
CO2 disuelto en agua	ppm	60	70
H2S disuelto en agua	ppm	0,9	1,5
O2 disuelto	ppb	>100	>100
Is (índice de solubilidad)	adimensional	0	-0,15
PTB	lb CaCO3/1000 Bls agua	2	0
Tendencia	(incrustaciones)	No hay problemas	No hay problemas

Fuente: (Landázuri, 2015)

Se debe realizar un tratamiento para reducir la dureza total, los cloruros que son indicadores de una alta salinidad. Además también tiene que aumentar el pH de agua.

Vapor para calentamiento

Otra de las aplicaciones de las importantes en la industria petrolera es el transporte de crudos pesados en el que es necesario un calentamiento del crudo para reducir su viscosidad y facilitar su movimiento en el oleoducto

Para empezar a transportar el crudo hay que calentarlo de forma indirecta por un sistema de circulación de aceite térmico para intercambiar calor. Las bombas principales dan la

envión necesaria para que el crudo tenga la presión adecuada para empezar a recorrer por el oleoducto.

En nuestro país el petróleo pesado es transportado por el Oleoducto de crudos pesados (OCP) en donde se bombea crudo desde la cuenca oriente hasta una estación marítima ubicada en Esmeraldas. En las estaciones de bombeo que tiene el oleoducto es necesario tener intercambiadores de calor como se mencionó anteriormente para ayudar en la movilidad del crudo. El proceso inicial se indica en la figura 5.1.



Figura 5.1 Procedimiento de calentamiento de crudo en las estaciones de bombeo del OCP.

Fuente: (OCP, 2020)

El petróleo que llega a las estaciones de bombeo, al inicio pasa por el procedimiento de filtrado en el que los sólidos presentes en el petróleo no deterioren los distintos dispositivos que van a entrar en contacto cuando recorra la tubería.

Consecutivamente, en caso de necesitarlo, se debe calentar el petróleo en los intercambiadores de calor (hornos), para mejorar su movilidad reduciendo la viscosidad (OCP ECUADOR, 2020).

Otra aplicación del vapor para calentamiento en la industria del petróleo es aumentar la temperatura del colchón agua en el tanque de lavado con un calentador como se muestra en la figura 5.2, lo cual ayuda a reducir el costo de operación porque la cantidad de químicos usada será menor optimizando así el proceso de separación en el tanque de lavado.

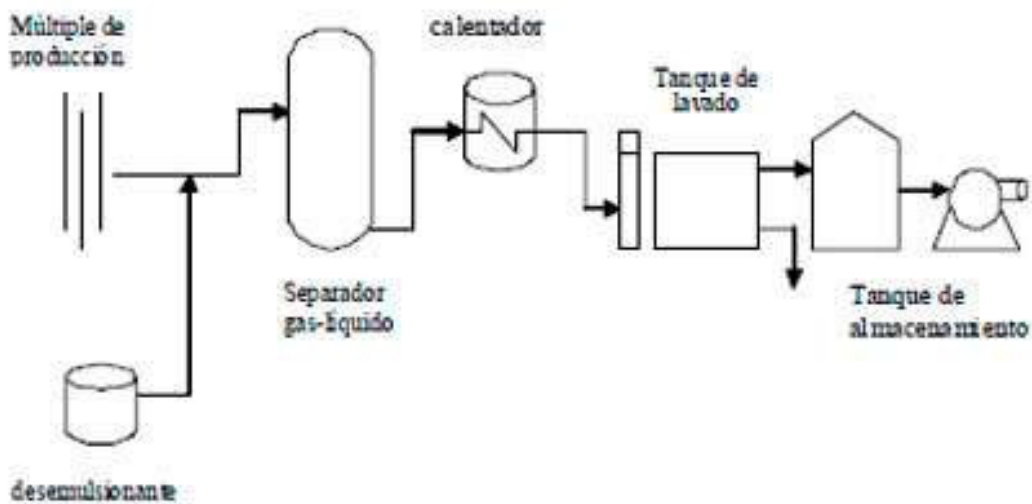


Figura 5.2 Calentamiento de crudo antes del tanque de lavado

Fuente: (OCP, 2020)

Tratamiento de Agua

Para esta aplicación se ha elegido el Análisis Físicoquímico del agua de formación del bloque 16, los valores se indican en la tabla 5.11.

Tabla 5.11 Análisis físico-químico del agua de formación bloque 16.

Parámetro	Unidad	Valor
pH		8
Temperatura	°C	27,5
Conductividad	mS/cm	34120
Salinidad	ppm	20300
Alcalinidad total	ppm CaCO ₃	870
Dureza total	ppm CaCO ₃	1180
Dureza cálcica	ppm CaCO ₃	970
Dureza magnésica	Ppm CaCO ₃	210
Ca ++	ppm	388
Mg ++	ppm	50,4
Cl --	ppm	12180
Na +	ppm	8120
Fe ++	ppm	0,5
STD	ppm	22860

Fuente: (Suarez, 2011)

El tratamiento que debería realizar para usar el vapor en los intercambiadores de calor en esta aplicación es reducir la dureza total, la salinidad y la concentración de sólidos totales y realizar un aumento del pH.

Cálculo de costos de generación de vapor

Luego de haber analizado las posibles aplicaciones del uso del vapor en la industria del petróleo, es importante saber cuánto es el costo de generar vapor, para lo que a continuación se realizará un ejemplo de cálculo del costo del vapor considerando todos sus costos asociados.

Para empezar vamos a tomar de referencia una turbina de vapor para generación de energía eléctrica con los siguientes datos (Lostaunau, 2007):

Potencia: 1000 kW

Caudal de vapor: 7000 kg/h = 5040000 kg/mes

La caldera para generar el vapor tiene los siguientes datos:

Temperatura de agua de alimentación: 25 °C

Presión de trabajo: 25 bar = 2500 kPa

Combustible: Fuel Oil.

Rendimiento: 85 %

Con los datos anteriores vamos a usar la ecuación [1] para calcular el costo del vapor:

$$PV = \frac{h_v - h_{AA}}{PCS * n} * 100 * PC + PQ + A + EE + OM$$

Los valores de las entalpías del agua de alimentación y del vapor saturado según la temperatura y presión tomados de las tablas A-4 y A-5 del apéndice 1 de la octava edición del libro *Termodinámica* de Y. Cengel mostradas en el Anexo. Estos valores son:

$h_{v@2500 \text{ kPa}} = 2801.9 \text{ (kJ/kg)}$

$h_{AA@25^\circ\text{C}} = 104.83 \text{ (kJ/kg)}$

El poder calorífico superior del combustible y el rendimiento de la caldera son:

$PCS = 41\,840 \text{ (kJ/kg)}$

$n = 85 \%$

Costos mensuales asociados

Costos suministro de agua: 35671,70 usd/mes

Costos químicos para tratamiento de agua: 17 285 usd/mes

Costo energía eléctrica: 2591,50 usd/mes

Costo mantenimiento y operación: 2300 usd/mes

Entonces para los datos para ingresar a la ecuación [1] quedan así:

Precio del combustible:

Según la Agencia de Control de Hidrocarburos el precio oficial para el fuel oil usado en la generación de electricidad es de 0,69440 usd/galón, pero para ingresar el valor en la fórmula debemos hacer un cambio de unidades con la densidad del combustible que es 0,94 kg/l.

PC: 0,195 usd/kg

$$PQ = \frac{17\,285 \text{ usd/mes}}{5040000 \text{ kg/mes}} = 0,003 \frac{\text{usd}}{\text{kg}}$$

Debido a que se va usar el agua de formación de producida entonces el costo del agua es

$$AA = \frac{35671,70 \text{ usd/mes}}{5040000 \text{ kg/mes}} = 0,0071 \frac{\text{usd}}{\text{kg}}$$

$$EE = \frac{2591,5 \text{ usd/mes}}{5040000 \text{ kg/mes}} = 0,0005 \frac{\text{usd}}{\text{kg}}$$

$$OM = \frac{2300 \text{ usd/mes}}{5040000 \text{ kg/mes}} = 0,0004 \frac{\text{usd}}{\text{kg}}$$

Entonces

$$PV = \frac{2801,9 - 104,83}{41840 * 85} * 100 * 0,195 + 0,003 + 0,0071 + 0,0005 + 0,0004$$

$$PV = 0,0258 \frac{\text{usd}}{\text{kg}}$$

Entonces el costo total y los costos parciales para producir vapor se muestran en la tabla 5.12 así:

Tabla 5.12 Costos para generar vapor con fuel oil

Costos	usd/kg	
	vapor	usd/mes
PV	0,0187	130032
PC	0,0148	74592
PQ	0,003	15120
A	0,0071	35784
EE	0,0005	2520
OM	0,0004	2016

Fuente: Autor

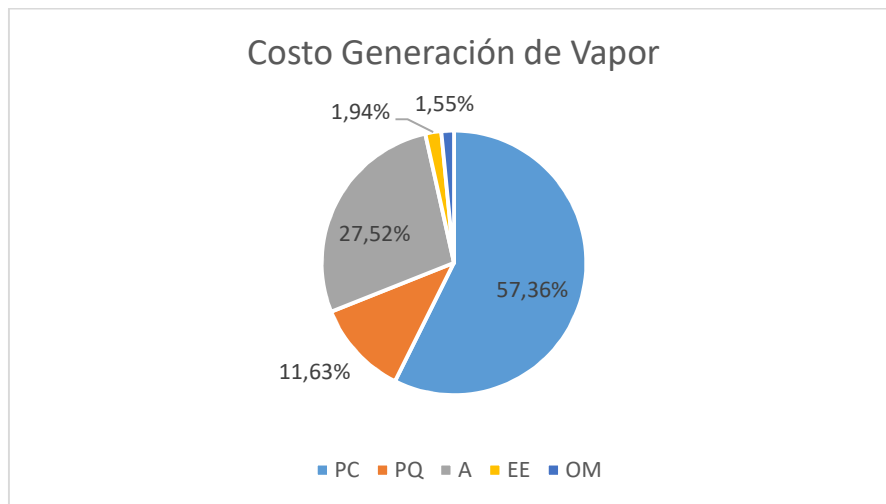


Figura 5.3 Porcentajes de cada costo asociado a la producción de vapor (fuel oil)

Como se puede observar en la figura 5.3 el combustible usado en la caldera para generar vapor representa el 57,36% de los costos totales.

Para obtener el costo para generar 1000 kW se tiene que realizar el producto entre el precio del vapor (PV) por los kilogramos de vapor necesarios para generar dicha potencia lo cual resulta un costo de 130032 usd/mes.

Si se realiza el análisis con gas natural obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 5.13 Costos para generar vapor con gas natural.

Costos	usd/kg vapor	usd/mes
PV	0,0761	383596,201
PC	0,0651	328156,201
PQ	0,0030	15120
A	0,0071	35784
EE	0,0005	2520
OM	0,0004	2016

Fuente: Autor

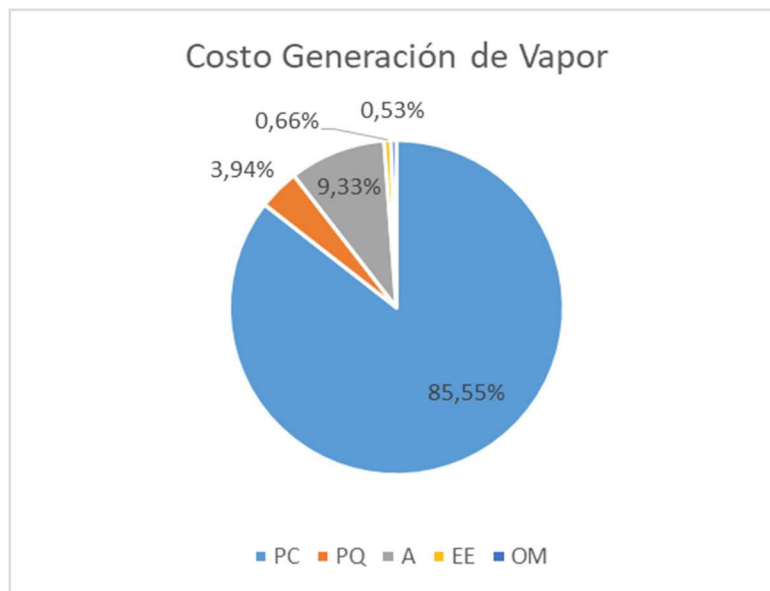


Figura 5.4 Porcentajes de cada costo asociado a la producción de vapor (gas natural)

Como se puede observar en la figura 5.4 el combustible usado en la caldera para generar vapor representa el 85,55% de los costos totales.

Para obtener el costo para generar 1000 kW se tiene realizar el producto entre el precio del vapor (PV) por los kilogramos de vapor necesarios para generar dicha potencia lo cual resulta un costo de 383596,201 usd/mes.

Dado que el gas natural en el Campo Sacha se quema en una tea, es decir no será necesario importar gas natural a precio internacional, existe un ahorro del precio de combustible y los costos para producir vapor bajaran considerablemente. Cabe mencionar que los PAD 420, 470 y 480 del Campo Sacha producen un volumen de gas de 1435008 MSCF anuales (Leiva, 2018) y que el volumen de gas necesario para la caldera necesita 2721,7 MSCF al año, quedando así cubierta la demanda del combustible para la caldera.

Tabla 5.14 Costos para generar vapor con gas natural sin costo.

Costos	usd/kg	
	vapor	usd/mes
PV	0,0110	55440
PC	0,0000	0
PQ	0,0030	15120
A	0,0071	35784
EE	0,0005	2520
OM	0,0004	2016

Fuente: Autor

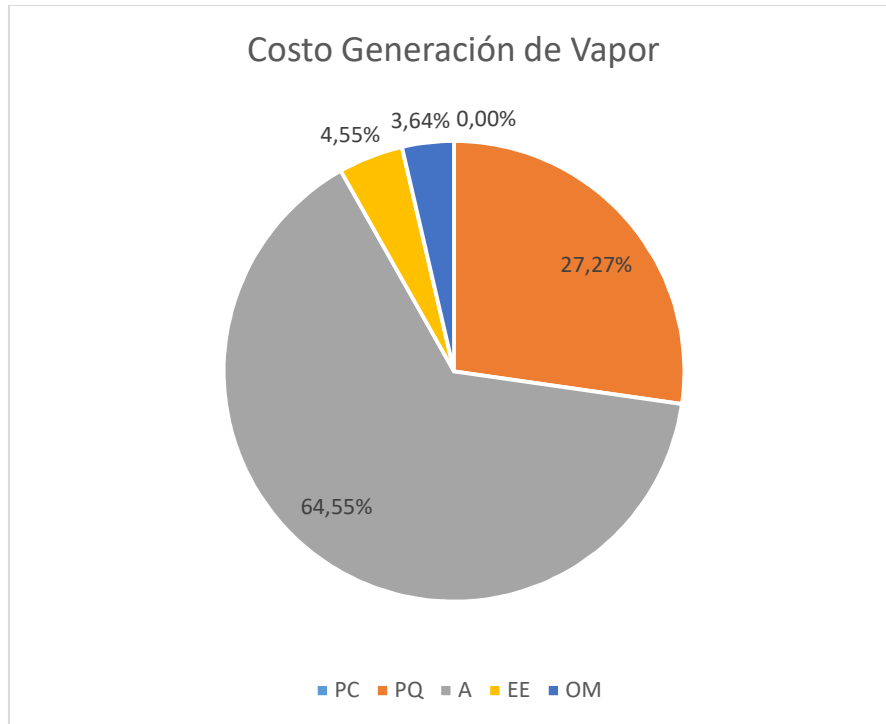


Figura 5.5 Porcentajes de cada costo asociado a la producción de vapor (gas natural/teas)

Como se puede observar en el figura 5.5, ahora el principal costo para generar vapor es el agua de alimentación y los productos químicos para tratamiento. El costo mensual necesario para la misma turbina es de 55440 usd/mes y 0,0110 usd por cada kilogramo de vapor producido.

Si para este ejemplo de generación de vapor para electricidad usamos los datos físico-químicos de la estación norte del Campo Sacha mostradas en la tabla 5.1 el tratamiento del agua será el siguiente:

- Ablandamiento: eliminar dureza (Ca^{+2} y Mg^{+2})
- Sobre 300 psig. Desmineralizar Resinas aniónicas (Cl^- , NO_3^-) (disminuir conductividad)
- Filtro con dióxido de Mg: eliminar Fe, opera $T < 60^\circ\text{C}$

- Membranas para eliminar gases Disueltos
- Desaerador: (O₂, CO₂)

Para los valores del agua de formación del agua de la Estación norte 1 del Campo Sacha según la información de la tabla 5.1 se debería realizar un tratamiento para la dureza total, es decir reducir en lo posible a cero (0) o dejar este valor en el límite superior permitido que es dureza 1, que incluye a la dureza cálcica y magnésica, un tratamiento para aumentar el pH y los reducir las ppm de hierro.

6. Conclusiones y Recomendaciones

- Según los requerimientos técnicos dentro del área petrolera, es posible en todas las aplicaciones el uso del agua de formación, con un adecuado tratamiento.
- En referencia a la generación de energía eléctrica, se debe tomar en cuenta que según las recomendaciones de las normas técnicas, el tratamiento del agua debe ser más riguroso debido a la complejidad de las turbinas de vapor y evitar graves daños en sus componentes ya que su mantenimiento es sumamente costoso.
- Para las otras aplicaciones el tratamiento de agua depende únicamente del tipo de caldera que se disponga en la empresa y de las recomendaciones en el manual del fabricante.
- El combustible usado en la generación de vapor es clave ya que este representa aproximadamente el 58% de los costos de generar vapor. Se deben buscar alternativas al combustible fósil usado en la caldera como por ejemplo desechos orgánicos de la agricultura (cascarilla de arroz, bagazo de la caña de azúcar, cáscara del cacao, etc.). En caso de no tener estas alternativas de combustible, se puede utilizar petróleo crudo o el gas natural asociado a la producción que es quemado en los mecheros de cada campo.
- El costo de generación del kWh de energía eléctrica con fuel oil es de 16 centavos de dólar aproximadamente que comparado con el precio oficial de 19 centavos de

dólar para el sector industrial existe un ahorro de 3 centavos por cada kWh consumido.

- Utilizando el gas natural consumido en las teas, el costo del kWh calculado es de 8 centavos de dólar aproximadamente, existiendo un ahorro de 11 centavos por cada kWh consumido.
- En el Campo Sacha se generan 12500 kWh. Si usamos fuel oil como combustible en las calderas el costo al año es de 17280000 de dólares. Utilizando el gas quemado en las teas el costo del consumo de energía es de 8640000 de dólares al año, generan un ahorro de 8640000 de dólares al año.
- La generación de vapor con agua de formación propuesta es ambientalmente viable, debido a que se elimina un gran volumen del agua asociada a la producción del crudo la cual actualmente se reinyecta. El proceso de reinyección produce serias afectaciones en los suelos y en cuerpos de aguas superficiales como subterráneas.

También se logra aprovechar el poder calorífico del gas natural asociado a la producción de petróleo, el cual es quemado en las teas.

7. Bibliografía

Abdou, Medhat, et al. Valor del agua de formación. *Oilfield Review*, 2011, vol. 23, no 1, p. 14.

APHA. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (20va. Ed.). New York, Estados Unidos.

Arpel. (2009). Guía para la disposición y el tratamiento de agua producida. Recuperado de: http://www.oilproduction.net/files/tratamiento_de_aguas_producidas.pdf (Febrero 2014).

Arnold, K., & Stewart, M. (1998). *Design of oil-handling systems and facilities*. Gulf Professional Publishing.

- Barba Díaz, D. L., & Martínez Villarreal, P. E. (2009). *Estudio y diseño de un sistema cerrado de reinyección de agua de formación para la Estación Central del Campo Sacha* (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2009).
- Bailey, B., Crabtree, M., Tyrie, J., Elphick, J., Kuchuk, F., Romano, C., & Roodhart, L. (2000). Control del agua. *Oilfield Review*, 12(1), 32-53.
- Barrera, C. (2014). Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales. *México DF: Reverté Ediciones*.
- Cantos Carrillo, J. L. (2017). *Diseño de una planta para el tratamiento de agua de formación para su reinyección en el campo Sacha* (Bachelor's thesis, Quito, 2017.).
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Termodinámica (8a)*. McGraw Hill Mexico.
- Córdova Zárate, D. A. (2017). Proyecto de inyección de agua de formación para incrementar el factor de recuperación en un campo X de la Amazonía ecuatoriana (Bachelor's thesis, CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E INDUSTRIAS FACULTAD: INGENIERÍA DE PETROLEOS).
- Díez, J. B., & Bielsa, J. I. G. (2012). Guía básica de calderas industriales eficientes. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid
- Fassler Carvajal, R. E. (2016). Evaluación de los consumos de energía en el sistema de inyección de agua en el yacimiento M1 en el campo Edén Yuturi, bloque 12 operado por Petroamazonas EP, en el año 2015. Diseño de un sistema de recuperación secundaria energéticamente eficiente (Master's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi: Dirección de Posgrados.).
- Fisair. (2016). *Fisair air humidity control*. Obtenido de <https://fisair.com/es/generacion-y-distribucion-de-vapor-limpio-para-instalaciones-de-climatizacion-en-la-industria-farmaceutica/>
- Green Oil Services. (2017). *Green Oil Services*. Obtenido de www.greenoilservices.com/hot-water-oil-steam-vapor/

- Haddad Osorio, j. I. (2017). Estudio técnico-económico para adquisición de nueva caldera para planta de producción de empresa cial alimentos.
- Jiménez, C. (1997). Cálculos de Procesos de Vapor en una Industria Textil. Guayaquil, Ecuador: Universidad Politécnica del Litoral.
- Martín, G. G. (2014). Influencia de la Calidad del Agua en Plantas de Potencia de Turbinas de Vapor (Doctoral dissertation, Universidad de Sevilla).
- Martinez, J. K., & Konopczynski, M. R. (2002, January). Integrated Reservoir Management in an Intelligent Well Environment. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Miranda López, L. O. (2016). *Diseño de una planta de reinyección de agua de formación en la estación central del campo Shushufindi-Aguarico* (Bachelor's thesis, Espol).
- Nordelo, A. B., & González, A. R. (2010). Combustión y Generación de vapor. Editorial Félix Varela.
- Leiva Álvarez, L. G. (2018). *Estudio de factibilidad para la utilización del gas asociado que se produce en tres plataformas del campo Sacha para generación eléctrica* (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
- Lostanau, L. M. Calderas y Turbinas de Vapor para la Generación de Energía Eléctrica. *Electrónica-UNMSM*, (19), 18-26.
- OCPECUADOR. (2020). *OCP ECUADOR*. Obtenido de <https://ocpecuador.com/es/funcionamiento/como-funciona-una-estacion-de-bombeo>
- Ramos Morales, A. R. (2014). *Descripción del proceso de reinyección de agua en la formación receptora Tiyuyacu del pozo guanta 07 del área Lago Agrio* (Bachelor's thesis, UNIVERSIDAD TECNOLOGICA EQUINOCCIAL. FACULTAD: CIENCIAS DE LA INGENIERÍA).

Rivera Veletanga, F. E. (2006). Mejoramiento del sistema de abastecimiento de vapor para la planta ferrero del ecuador utilizando PLC (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2006).

Spirax Sarco. (2020). VAPOR PARA LA INDUSTRIA. Obtenido de <https://vaporparalaindustria.com/blog/>

Suarez Aguas, W. S. (2011). *Disposición del agua de formación para inyección en el bloque 16 campo Amo* (Bachelor's thesis, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL. FACULTAD: CIENCIAS DE LA INGENIERÍA).

Umaña López, C. A. (2011). Optimización del sistema de vapor del plantel de refinería RECOPE SA Moín, Limón.

TVL. (2020). TVL. Obtenido de <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/principal-applications-for-steam.html>

Warren, John K. *Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons*. Springer Science & Business Media, 2006.

8. Anexos

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat} kPa	Volumen específico, m ³ /kg			Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g	
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556	
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249	
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999	
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803	
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661	
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567	
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520	
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517	
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556	
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633	
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748	
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898	
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082	
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296	
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540	
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812	
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111	
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435	
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782	
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151	
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542	
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952	
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382	
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829	
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292	
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771	
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265	
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773	
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294	
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827	
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371	
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927	
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492	
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067	
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650	
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242	
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841	
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447	
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059	
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678	
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302	

Agua saturada. Tabla de temperaturas (conclusión)

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Liq. sat, v_f	Vapor sat., v_g	Liq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Liq. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Liq. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11,284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Fuente: Las tablas A-4 a A-8 fueron generadas utilizando el programa para resolver ecuaciones de ingeniería (EES) desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. La rutina utilizada en los cálculos es la altamente precisa Steam_IAPWS, que incorpora la Formulación 1995 para las Propiedades Termodinámicas de la Sustancia Agua Ordinaria para Uso Científico y General, editada por The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS). Esta formulación reemplaza a la formulación de 1984 de Haar, Gallagher y Kell (NBS/NRC Steam Tables, Hemisphere Publishing Co., 1984), la cual está también disponible en EES como la rutina STEAM. La nueva formulación se basa en las correlaciones de Saul y Wagner (J. Phys. Chem. Ref. Data, 16, 893, 1987) con modificaciones para ajustarla a la Escala Internacional de Temperaturas de 1990. Las modificaciones están descritas por Wagner y Pruss (J. Phys. Chem. Ref. Data, 22, 783, 1993). Las propiedades del hielo están basadas en Hyland y Wexler, "Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H₂O from 173.15 K a 473.15 K", ASHRAE Trans., Part 2A, Paper 2793, 1983.

TABLA A-5

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Liq. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Liq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Liq. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Liq. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
		1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

TABLA A-5

Agua saturada. Tabla de presiones (conclusión)

Pres., P kPa	Temp. sat., T _{sat} °C	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070