

## EVALUACIÓN TEÓRICA DE MEZCLAS DE REFRIGERANTES CON GRAN POTENCIAL EN BOMBAS DE CALOR POR COMPRESIÓN DE VAPOR DE ALTA TEMPERATURA

Mónica M. Omaña<sup>\*\*</sup>, Farid Chejne<sup>\*\*</sup>, Cesar A. Isaza<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1 #70-01, of. 11-259, Medellín, Colombia.

<sup>\*\*</sup> Universidad Nacional de Colombia, Carrera 80 No 65-223 – Núcleo Robledo, Medellín, Colombia

Recibido 15 Noviembre 2013; aceptado 30 Marzo 2014

Disponible en línea: 30 Julio 2014

**Resumen:** Este proyecto desarrolló un método para evaluar teóricamente mezclas de refrigerantes que tienen propiedades termodinámicas adecuadas para trabajar en una bomba de calor de compresión de vapor, que utiliza calores residuales de temperaturas cercanas a los 30 °C en el evaporador, produciendo una temperatura igual o superior a 80 °C en el sumidero de calor, y con las cuales se obtengan rendimientos de operación iguales o superiores a 3. De esta forma, se puede poseer una herramienta para seleccionar las mezclas que cumplan con los requerimientos deseados para dicho proyecto.

**Palabras clave:** Bomba de calor, mezcla de refrigerantes, recuperación de calor residual

## THEORETICAL EVALUATION OF REFRIGERANT MIXTURES WITH GREAT POTENTIAL IN HIGH TEMPERATURE STEAM COMPRESSION HEAT PUMPS

**Abstract:** This project developed a method of assessing refrigerant blends theory with thermodynamic properties appropriate for work in a heat pump vapor compression, which uses waste heat to temperatures of 30 °C in the evaporator, to obtain a temperature at or above 80 °C in the heat sink, and that gain operation yields equal to or greater than 3. Therefore, it possesses a tool for selecting a mixture meeting the desired requirements for the project.

**Keywords:** Heat pump, refrigerant blends, waste heat recovery

### 1. INTRODUCCIÓN

La situación energética se ha convertido en una gran preocupación para la humanidad, pues en el mundo se consume energía proveniente en su mayor parte (80%) de la combustión de los llamados combustibles fósiles: carbón, petróleo, y gas natural, debido a que estos se encuentran con

gran disponibilidad en el mercado y a bajo precio ([Cátedra BP, 2011](#)). Sin embargo, este modelo energético es difícil de sostener, porque este tipo de combustibles son limitados y tienen gran incidencia sobre el medio ambiente; además, el elevado crecimiento de los países emergentes, provoca un aumento en la demanda de energía a nivel global e implica la optimización del uso de

---

† Autor al que se le dirige la correspondencia:

Tel. (+57) (4) 4488388 ext 12849.

E-mail: [monica.omana@gmail.com](mailto:monica.omana@gmail.com) (Mónica Marcela Omaña Yáñez).

los recursos energéticos existentes que no va encaminada exclusivamente enfocada al ahorro de energía, la eficiencia en el aprovechamiento de la energía o al uso de energías alternativas, sino, también en el trabajo con energías residuales o de desechos comunes como son aguas de enfriamiento, condensados, gases de combustión, aire húmedo entre otros, que son producidos por maquinas, equipos eléctricos y procesos industriales como calderas, secadores, torres de enfriamiento, plantas de refrigeración o plantas de generación de energía, que no tienen ninguna aplicación útil en el proceso y son desechados al ambiente, provocando desperdicio energético.

Por medio de estudios, se ha presentado que de la energía desechada en los procesos industriales, aproximadamente un 40 a 60% puede ser recuperada, donde la tecnología de bomba de calor (BC), juega un papel importante en el uso más eficiente de la energía en la industria, dado que pueden recuperar calores residuales con temperaturas alrededor de 40 °C. Las bombas de calor por compresión de vapor son sistemas utilizados para el calentamiento de un fluido contenido en un espacio. El ciclo de trabajo de este equipo es el de refrigeración y está compuesto básicamente por un evaporador, un compresor, un condensador y una válvula de expansión, capaz de forzar el flujo de calor en la dirección contraria a la forma natural (desde altas a bajas temperaturas). Las bombas de calor pueden transferir este calor desde las fuentes naturales del entorno a baja temperatura (fuente de calor), tales como aire, agua o la propia tierra, hacia recintos que se desean calentar, o bien para emplearlo en procesos que precisan calor (sumidero de calor).

En la actualidad, existen comercialmente bombas de calor que son utilizadas principalmente para el calentamiento de agua sanitaria, calefacción de piscinas o en procesos de secado, entregando calor por lo general en un rango de temperatura de 30 y 40 °C, usando como fuente de calor, el ambiente, el cual se encuentra a temperaturas entre 20 y 30 °C. Sin embargo, el principal problema de estos equipos comerciales se presenta en el momento de trabajar con altos rangos de temperatura entre 80 y 100 °C ([Toro et. al, 2007](#)); y para las cuales, los equipos comerciales no están acondicionados, pues normalmente trabajan con fluidos refrigerantes puros, como el R-134a que alcanza temperaturas menores a las deseadas para este trabajo, pues poseen una temperatura crítica por debajo de 80 °C, o fluidos como R-22 que posee

una temperatura crítica con la que se puede alcanzar la temperatura deseada, pero que implica un trabajo a alta presión, y por ende un gran consumo energético y un gran riesgo para el compresor porque excede sus límites de presión de trabajo, y hace que su ciclo de trabajo sea ineficiente.

Debido a que comercialmente no se disponen bombas de calor de altas temperaturas y considerando que es una tecnología limpia y eficiente para aprovechar los calores residuales de ciertos procesos industriales, se realizó una revisión de la literatura, la cual sugiere el uso de mezclas refrigerantes ([Radermacher & Hwang, 2005](#)) que posean propiedades termodinámicas apropiadas para operar en las condiciones deseadas y con la tecnología disponible, para obtener altas temperaturas, como se observa a continuación con los siguientes autores:

Jakobs, reportó que el rendimiento de una bomba de calor se maximiza con el uso de mezclas de refrigerantes, como es el caso del R12/R114 (0,6/0,4), comparado con respecto al R12 ([Jakobs et. al, 1979](#)). Henderson obtuvo un incremento en el COP con el uso de R410a ([Henderson et. al, 2001](#)). Rakhesh, recomienda el uso del refrigerante HFC R227 para obtener temperatura de condensación de 75 °C, y un COP del sistema entre 3,5 y 4,5 ([Rakhesh et al., 2003](#)).

Nanxi estudió una bomba de calor agua – agua con una fuente de calor de 32 °C a 55 °C, con una mezcla compuesta por R124/R142b/R600a, obteniendo una temperatura de 85 °C en el agua de salida del condensador y un COP mayor a 3 ([Nanxi et. al, 2005](#)).

Zhang probó tres mezclas de refrigerantes zeotrópicos, M1A (R245fa/R152a, 0,8/0,2), M1B (R245fa/R152a, 0,63/0,37) y M1C (R245fa/R152a, 0,5/0,5), con temperatura de evaporación de 45 °C, arrojando como resultado una temperatura de condensación entre 70-90 °C ([Zhang et. al, 2010](#)).

Kim reportó que trabajar con mezclas refrigerantes en el ciclo de la bomba de calor, tiene mayor COP que con refrigerantes puros ([Kim et. al, 1994](#)).

Shi obtuvo temperaturas entre 60 – 90 °C a la salida del condensador utilizando mezclas de refrigerantes, siendo dos de estas patentadas ([Shi & Zan, 2008](#)).

Smit y Meyer ([Smit & Meyer, 1998](#)), así como Johansen ([Johansen, 1992](#)) demostraron analíticamente que una mezcla azeotrópica de R-22/R-142b (CCIF2CH3) para diferentes composiciones (60/40 y 80/20), pueden alcanzar temperaturas de 90 °C y 80 °C, respectivamente.

Li, probó la mezcla R22/R141b, logrando una temperatura en el agua a la salida del condensador de 80 °C ([Li et. al, 2002](#)).

Por el gran interés que se observa en las investigaciones referenciadas, por evaluar mezclas de refrigerantes para altas temperaturas, en este trabajo se presenta una herramienta matemática que evalúa el comportamiento de diferentes mezclas de refrigerantes que poseen propiedades termodinámicas apropiadas para trabajar en una bomba de calor por compresión de vapor, que utiliza calores residuales con temperatura promedio entre 30 y 40 °C, que pueden ser aprovechados en el evaporador para lograr temperaturas de condensación iguales o superiores a 80 °C en fluidos limpios (aire o agua). Además, esta herramienta evalúa los parámetros de desempeño del sistema, como son el coeficiente de rendimiento (COP), el flujo de calor de condensación y la potencia consumida por el compresor.

Obteniendo como resultado, 16 mezclas que cumplen con la temperatura deseada y un COP igual o superior a 3. La mezcla conformada por R141b-R22 de fracción molar 0,5/0,5 es evaluada y probada en el equipo experimental de laboratorio, alcanzando la temperatura de condensación proyectada para el sistema.

En la sección 2 se explica las propiedades termodinámicas adicionales y necesarias para trabajar con mezclas de refrigerantes, en la 3 se muestran las herramientas matemáticas que existen para trabajar con fluidos refrigerantes, en la 4 se muestra la metodología utilizada para obtener las mezclas de refrigerantes que permiten obtener altas temperaturas en una bomba de calor, en la sección 5 se explica el proceso utilizado para obtener las propiedades de las mezclas de refrigerantes, en la 6 se muestran los resultados obtenidos en el proyecto de investigación, en la 7 se da a conocer el potencial de este trabajo para la industria, finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo.

## 2. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE MEZCLAS DE REFRIGERANTES

Las propiedades termodinámicas para las mezclas pueden ser calculadas a partir de modelos termodinámicos: los modelos basados en ecuaciones de estado y/o los modelos de actividad. Para calcularlas a partir de ecuaciones de estado, se destacan: la ecuación de estado (EoS del inglés Equation of State) de Peng-Robinson ([Peng & Robinson, 1976](#)) y la EoS de Patel Teja ([Patel & Teja, 1982](#)) y el modelo de actividad NRTL ([Renon & Prausnitz, 1968](#)). Siendo el punto de partida para el cálculo de propiedades de mezclas, la sustancia pura y sus parámetros. Para la EoS de Peng-Robinson, es necesario contar con la temperatura crítica (Tc), la presión crítica (Pc) y el factor acéntrico (Omega) de las sustancias involucradas en el proceso. Para la EoS de Patel – Teja, se necesitan Tc y Pc, más dos parámetros particulares del modelo y propios de cada sustancia F y ζc. En el caso del modelo de actividad, son necesarias una ecuación para la presión de vapor y una expresión para la predicción de volúmenes de líquidos saturados.

Finalmente, el procedimiento anteriormente descrito, es empleado por herramientas computacionales que permiten la evaluación de estas propiedades en forma precisa y confiable en un corto tiempo. Logrando de esta forma generar tablas o diagramas, con la inserción de variables como la temperatura, presión o concentración de la mezcla.

La concentración de una mezcla puede ser definida como fracción de masa (x) o fracción molar (y). Definiéndose la fracción másica (o de masa) como se muestra en la ecuación 1.

$$x = \frac{\text{masa de un componente [kg]}}{\text{masa de los componentes de la mezcla [kg]}} \quad (1)$$

La cual incluye valores en el rango de  $0,0 \leq x \leq 1,0$ ; con 0,0 y 1,0 que indica los componentes puros respectivos.

Y la fracción molar (y), se define como se muestra en la ecuación 2.

$$y = \frac{\text{moles de un componente [kmol]}}{\text{moles de los componentes de la mezcla [kmol]}} \quad (2)$$

Donde y, incluye valores en el rango de  $0,0 \leq y \leq 1,0$ ; con 0 y 1 indicando los componentes puros respectivos.

*Diagrama temperatura-fracción másica* (Radermacher & Hwang, 2005). Este, es uno de los diagramas más importantes, que se obtiene a partir de la herramienta computacional, el cual permite la comprensión de las mezclas de fluidos de trabajo (Ver Fig. 1), pues, en este se logra apreciar cada una de las fases del fluido, y cuando estas dos fases, líquido y vapor de una mezcla, coexisten en el equilibrio.

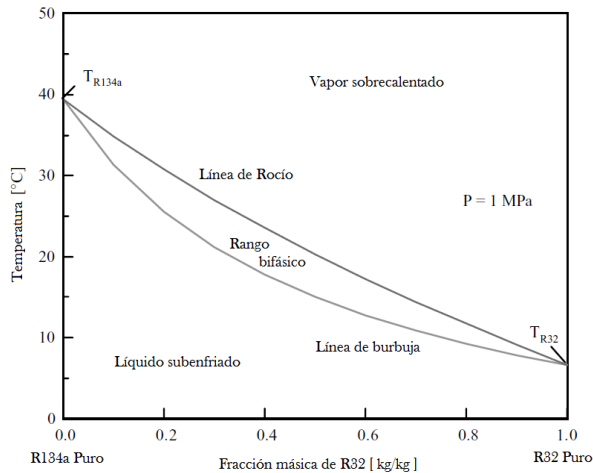


Figura 1. Diagrama temperatura-fracción másica para R32/R134a. Tomada de Radermacher R. y Hwang Y., 2005

El diagrama de la figura 1 presenta una mezcla de dos componentes, R134a y R32, a presión constante de 1,0 MPa. Los rangos de fracción de masa de los ejes va de 0.0 (R134a puros) a 1,0 (R32 puro). El área debajo de la línea de burbuja, representa la zona de líquido subenfriado, el área por encima de la línea de rocío, representa vapor sobrecalentado. El área delimitada entre la línea de la burbuja y la de rocío, es la región del rango de dos fases.

El punto de ebullición para una mezcla de fracción másica  $x$  está situado en la línea de burbuja. La línea de burbuja, indica la temperatura de saturación a la cual se forma la primera burbuja de vapor para una presión y fracción de masa especificada, cuando la mezcla es llevada de una temperatura de la región de líquido subenfriado, hasta el vapor de saturación. Y la línea de rocío indica la temperatura a la cual se forma la primera gota de líquido cuando una mezcla de gas sobrecalentado de una fracción de masa dada se enfría a presión constante.

En la figura 1, se observa que a una presión constante, la temperatura de saturación ( $T_{sat}$ ) varía

con la fracción de masa y el comportamiento de  $T_{sat}$ , contrasta con la de un fluido puro, donde  $T_{sat}$  permanece constante. También, se intuye que los puntos de ebullición de los componentes puros TR134a y TR32, se encuentran en las ordenadas respectivas y que el punto de ebullición del R134a es mayor que el de R32.

Teniendo en cuenta las temperaturas de burbuja y de rocío, se puede obtener la temperatura de deslizamiento (TDES), la cual resulta, de la diferencia entre en estos dos puntos a una fracción másica determinada. Esta temperatura de deslizamiento, presenta una relación directa con respecto a la diferencia entre los puntos de ebullición de la mezcla, además de estar en función de la fracción de masa ( $x$ ).

*Mezclas zeotrópicas.* Las mezclas que muestran las características de la figura 1 se denominan tradicionalmente mezclas zeotrópicas en la literatura más reciente, o mezclas no azeotrópicas en la más antigua. El nombre implica que en equilibrio de fases las fracciones de masa ( $x$ ) de las fases vapor y líquido, son siempre diferentes.

*Mezclas azeotrópicas.* Existen también, otro tipo de mezclas como son las azeotrópicas, para las cuales, las fracciones másicas de la fase líquida y vapor son idénticas a una cierta presión y temperatura como se observa en la Figura 2a y 2b,

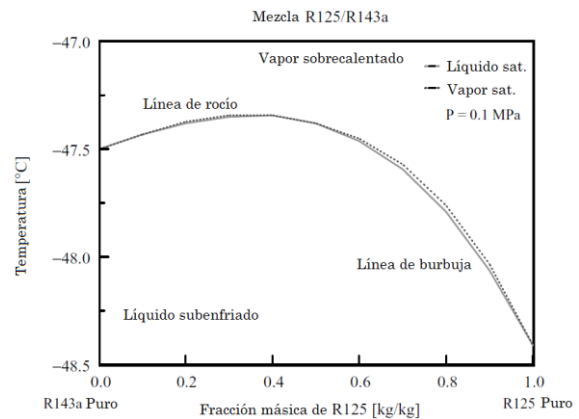


Figura 2a. Diagrama T - x para el azeótropo R507A a una presión de 0,1 MPa. Tomada de Radermacher R. y Hwang Y., 2005

En la figura 2b se muestra que la temperatura de deslizamiento es muy pequeña en todo el rango de fracción de masa, lo cual es generado por la consecuencia de dos características: puntos de ebullición muy cercanos de los componentes puros



y que el punto de burbuja y de rocío no divergen porque los dos componentes forman un azeótropo, lo cual es de gran importancia para aplicaciones en bombas de calor, debido a que este tipo de mezclas, podría llegar a considerarse como un fluido puro en termino de sus propiedades.

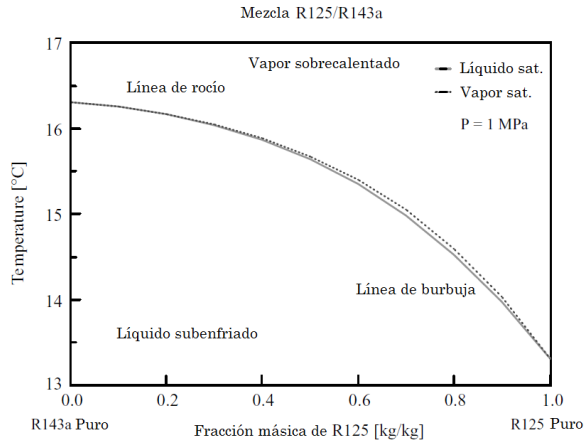


Figura 2b. Diagrama T - x para el azeótropo R507A a una presión de 1 MPa. Tomada de Radermacher R. y Hwang Y., 2005

Hay características únicas de mezclas azeotrópicas que pueden hacer su uso benéfico. En primer lugar, estas proporcionan otro único punto de ebullición normal que no podrían ser cubiertos por uno de los componentes puros de refrigerantes y por lo tanto existe la posibilidad de ajustar algunas aplicaciones específicas con mayor precisión. En segundo lugar, tienen todos los beneficios de los refrigerantes de componentes puros (punto de ebullición constante y calor de vaporización, sin fraccionamiento). Adicionalmente, se debe conocer, que una mezcla zeotrópica puede tener un punto azeotrópico en otras condiciones y viceversa.

### 3. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA LA OBTENCIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS

Hoy en día, en el mercado se encuentran herramientas computacionales sofisticadas que no sólo dan los resultados deseados numéricos, sino también ofrecen la oferta de las salidas en forma gráfica colorida para presentaciones impresionantes. Este tipo de herramientas, posee una base de datos de propiedades de refrigerantes que calcula las propiedades termofísicas de fluidos

puros y sus mezclas. Algunos de estos programas, son presentados a continuación:

FluidProp, es un programa que calcula las propiedades, utilizando los últimos modelos físicos, además, participó en la implementación del modelo REFPROP.

GasMix, programa que utiliza un modelo de gas ideal para fluidos y mezclas.

IF97, software que implementa modelos para el cálculo de las propiedades termodinámicas y de transporte de agua y de vapor según las IAPWS .

StanMix, sistema operativo computacional que emplea un modelo basado en una ecuación de estado de tercer orden y modernas reglas de mezcla que describen una gran variedad de fluidos y mezclas con pocos parámetros.

TPSI, software que implementa modelos termodinámicos precisos para pocos fluidos, como se describe en: Reynolds, William Craig, Thermodynamic properties in S.I.: Graphs, Tables, and Computational Equations for Forty Substances. Stanford, CA. Department of Mechanical Engineering- Universidad de Stanford, 1979.

Thermo, sistema computacional que implementa ecuaciones de gas ideal, gas ideal Z, Van der Waals, Redlich-Kwong, Soave-Redlich-Kwong, Peng-Robinson, II Clausius y los Martin-Hou ecuaciones de estado para fluidos puros.

REFPROP, software que implementa ecuaciones de referencia del estado, así como las ecuaciones técnicas de estado para fluidos puros y mezclas. REFPROP es desarrollado y mantenido por el Instituto Nacional de Normas y Tecnologías. Siendo esta herramienta la utilizada para este trabajo. Este programa, posee una base de datos de propiedades de refrigerantes que calcula las propiedades termofísicas de fluidos puros y sus mezclas de hasta cinco componentes (Huber, Gallagher et al. 1996).

EES, es un programa que resuelve sistemas algebraicos lineales, no lineales o ecuaciones diferenciales. Tiene una gran biblioteca integrada de funciones de propiedades termodinámicas, así como funciones matemáticas, y permite que el usuario proporcione los datos de propiedades adicionales. A diferencia de otros paquetes de software, EES no resuelve los problemas de

ingeniería, sino que sólo resuelve las ecuaciones suministradas por el usuario. Por lo tanto, el usuario debe entender el problema y formularlo mediante la aplicación de las leyes físicas y relaciones. EES ahorra tiempo al usuario y esfuerzo, simplemente resolviendo las ecuaciones matemáticas resultantes.

#### 4. METODOLOGÍA PARA GENERAR UNA BASE DE DATOS DE MEZCLAS APTAS PARA ALTAS TEMPERATURA

La metodología utilizada para la evaluación teórica de mezclas de refrigerantes, se muestra a continuación:

Se inicia con los cálculos de requerimientos energéticos (carga térmica) de una bomba de calor de alta temperatura, para determinar las condiciones a las cuales debería trabajar el fluido en el sistema para alcanzar los requerimientos de la bomba de calor.

Luego, se hace una revisión bibliográfica, de la cual se obtiene una base teórica de mezclas de refrigerantes, sin importar si son para aplicación de alta o baja temperatura.

Se prosigue con la evaluación de las temperaturas críticas de cada uno de los refrigerantes que componen las mezclas anteriormente obtenidas. Consiguiendo reunir los refrigerantes con una temperatura crítica ( $T_c$ ) superior a  $95^\circ\text{C}$ .

Se evalúan las propiedades termodinámicas de cada componente puro que compone cada mezcla de la base de datos obtenida inicialmente y saber si posee o no, propiedades idóneas para alcanzar el objetivo de este proyecto, como por ejemplo la temperatura crítica.

Al identificar los refrigerantes puros con las mejores propiedades termodinámicas, se mezclan estos componentes entre sí, creando de esta forma nuevas y diferentes mezclas de refrigerantes (que no se encontraban descritas en la literatura).

Al tener definidas las mezclas a evaluar, se procede con la evaluación teórica de las propiedades termodinámicas de las mezclas por medio de diagramas obtenidos con el programa REFPROP o por medio de los datos que son arrojados por el software EES-REFPROP, lo cual, permite conocer el comportamiento de las propiedades termodinámicas a diferentes

condiciones de presión y temperatura, de cada una de las mezclas ya obtenidas, y de esta forma se identifica las condiciones a las que debe ser sometido la mezcla refrigerante para ser un fluido con el cual se logren las altas temperaturas y determinar las condiciones de trabajo de los equipos que conforman la bomba de calor (compresor, válvula de expansión e intercambiadores de calor).

Finalmente, se evalúa en conjunto los requerimientos de la bomba de calor, junto con las propiedades de cada mezcla, obteniéndose información del comportamiento que tiene cada una de estas mezclas en el sistema, logrando la obtención de las de mejor rendimiento.

#### 5. OBTENCIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE MEZCLAS DE REFRIGERANTES

En el proceso de obtención de mezclas de refrigerantes que provean alta temperatura en una bomba de calor, se realizó una revisión bibliográfica, de los cuales se obtienen mezclas de refrigerantes que han sido tomadas como fluidos teóricos o aplicados para la obtención de altas o bajas temperaturas en diferentes trabajos reportados de la bibliografía, se prosigue con la evaluación de las temperaturas críticas de cada uno de los refrigerantes puros que componen cada mezcla. De estas mezclas de refrigerantes obtenidas a partir de la bibliografía, se seleccionan las que posean en sus componentes, algún refrigerante puro con temperatura crítica ( $T_c$ ) mayor a  $95^\circ\text{C}$ , además de esto se obtiene la presión crítica, ( $P_c$ ), estas propiedades son obtenidas del programa Engineering Equation Solver (EES®), obteniendo 15 fluidos refrigerantes, que son: R114, R142B, R134A, R152A, R124, R143A, R125, R218, RC18, R32, R227EA, R123, R22, R23, R141B.

Con estos fluidos puros identificados, se puede crear nuevas y diferentes mezclas de refrigerantes, que no se encontraban descritas en la literatura, y que pueden ser generadas al momento de mezclar aquellos componentes que tienen propiedades térmicas idóneas para cumplir con el objetivo.

Con estos componentes identificados, se toma nuevamente la base de datos teórica realizada inicialmente, y en ella, se identifican las mezclas que contienen estos componentes puros que tienen las condiciones de temperatura y presión crítica

idóneas, obteniendo así, posibles mezclas de trabajo para altas temperatura.

En diferentes literaturas encontradas, se observa que las propiedades termodinámicas y termofísicas de los refrigerantes se calculan utilizando el software REFPROP® (Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties) (Radermacher & Hwang, 2005), debido a ser un software de fácil implementación y por ser una herramienta de gran precisión.

Existen dos métodos para la evaluación de las propiedades termodinámicas de las mezclas de refrigerantes, obteniendo con estas propiedades como la  $T_c$  y la  $P_c$  de la mezcla de refrigerantes. Un método es gráfico y el otro es una herramienta matemática.

### 5.1. Obtención de propiedades termodinámicas de mezclas de refrigerantes a partir de gráficos arrojados por el programa Refprop

Uno de los diagramas que es posible obtener a partir del software REFPROP®, es el que se observa en la figura 3, donde se muestra el diagrama de fase para una mezcla de refrigerantes (por ejemplo, R22/R141B), en donde se indica con las líneas roja y azul, las temperaturas de rocío y de burbuja a una fracción molar y presión de trabajo de condensación determinada de una mezcla de que hace parte de la bomba de calor.

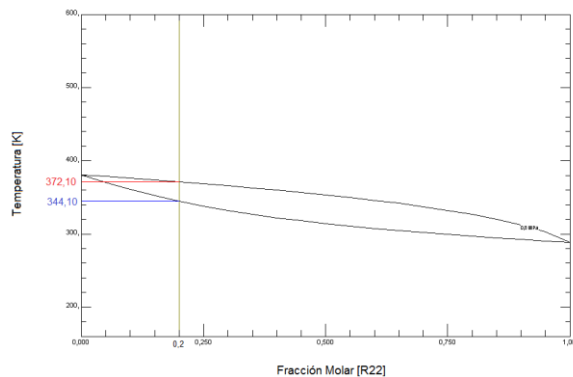


Figura 3. Diagrama de Temperatura Vs. Fracción másica de la mezcla de refrigerantes en el condensador

Donde se obtiene una temperatura de salida del compresor de 99 °C, a una presión determinada de 0.8 MPa, y una temperatura de salida del

condensador de 71°C. La línea amarilla vertical, son las fracciones molares a las que se evalúa el refrigerante R22/R141B (0,2/0,8), esta composición debe ser seleccionada para cada mezcla de refrigerante, de tal manera que cumpla con las condiciones de trabajo en el condensador. Y de esta forma se obtienen las temperaturas de condensación (línea roja horizontal) y de evaporación (línea azul horizontal) a una presión determinada.

Otro de los diagramas que puede ser obtenido por el programa REFPROP, es el de la figura 4, el cual corresponde a un diagrama de Temperatura-Entalpía para la mezcla R22/R141B, donde se ilustran las temperaturas de entrada (gris) y salida (verde) de la mezcla de refrigerantes y se puede leer las respectivas entalpías, con las que se evaluó el calor requerido para el calentamiento de agua en dicho equipo.

### 5.2. Obtención de propiedades teóricas de mezclas de refrigerantes por medio de software

El software REFPROP® arroja datos de propiedades termodinámicas y de transporte precisos para fluidos puros y mezclas de fluidos. Si estos datos quisieran ser utilizados en un programa, deben crearse subrutinas donde se puede utilizar una interfaz, como es EES-REFPROP®, la cual es una licencia que permite utilizar las propiedades obtenidas, a través del programa REFPROP®, obteniendo así los valores de las variables que se necesitan para ser utilizados en el programa elaborado en EES® (Engineering Equation Solver).

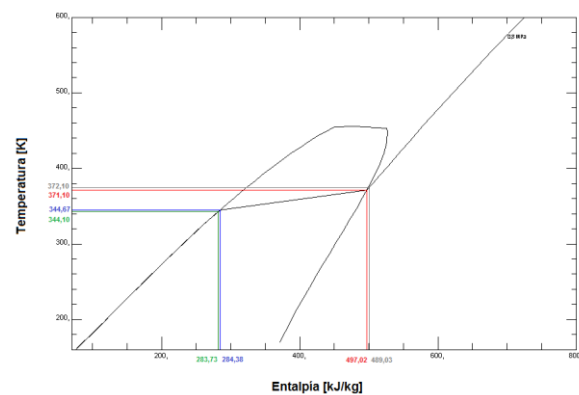


Figura 4. Diagrama de temperatura Vs entalpía de la mezcla de refrigerantes

Estos software o herramientas computacionales presentan un ahorro en el tiempo de búsqueda de las propiedades, pues, arroja tablas y diagramas con la información necesaria para conocer el comportamiento de la mezcla a diferentes condiciones de presión y temperatura. En tanto que con el programa en EES® que utiliza la licencia EES\_REFPROP®, se pueden realizar rutinas, con las que se pueden obtener las propiedades de la mezcla.

### 5.3. Consideraciones para la evaluación teórica de mezclas de refrigerantes en una bomba de calor

Para la evaluación de las mezclas de refrigerantes en un sistema de bomba de calor a compresión de vapor, se realizó un programa en el software EES®, con el cual se evalúan en conjunto, los requerimientos de la bomba de calor, junto con las propiedades térmicas de las mezclas idóneas para alcanzar una alta temperatura en el agua del sumidero, y de esta forma, obtener información del comportamiento y rendimiento que tiene cada mezcla en el sistema bajo condiciones específicas.

Para los requerimientos del sistema, se evalúa un modelo de predicción estacionaria del funcionamiento de un ciclo convencional de compresión de vapor (o bomba de calor) agua-agua. Donde se realizan los balances de energía en cada una de las partes que componen el sistema, como son el balance de energía en el evaporador, para obtener el calor de evaporación (QE), que es el calor ganado por el refrigerante en el evaporador. El balance de energía en el condensador, donde se consigue el calor de condensación (QC), que es el calor ganado por el sumidero de calor, se obtiene del balance en el condensador. El balance de energía en el compresor, permite estimar la temperatura de descarga, así como la potencia consumida por el compresor.

Finalmente, se evalúa el COP del sistema, que es el indicador de rendimiento del tipo de equipos que se manejan en este trabajo, obtenido a través de la relación entre el beneficio obtenido, dividido por el gasto energético o trabajo neto utilizado, así como se describe en las ecuaciones 3 a 5.

$$\text{COP}_{\text{BC}} = \frac{\text{Calor ded condensación}}{\text{Trabajo de compresión}} \quad (3)$$

$$\text{COP}_{\text{BC}} = \frac{Q_C}{W_{\text{COMP}}} = \frac{Q_C}{(Q_C - Q_E)} \quad (4)$$

$$\text{COP}_{\text{BC}} = \frac{T_{\text{COND}}}{(T_{\text{COND}} - T_{\text{EVAP}})} \quad (5)$$

Donde COPBC, es el coeficiente de desempeño de la bomba de calor, WCOMP, es el trabajo de compresión y ΔS, es el delta de entropía.

El modelo trabajado, utilizan algunas consideraciones que deben ser tenidas en cuenta: las zonas de evaporación, compresión y condensación, corresponde a los procesos que ocurren entre el punto 4-1, 1-2 y 2-3, respectivamente, como se observa en la [figura 5](#). Donde,

- 1: Condición de succión del compresor como vapor sobrecalentado.
- 2: Condición de descarga real del compresor.
- 3: Condición de entrada del refrigerante a la válvula de expansión.
- 4: Condición de entrada en el evaporador.

- 1,sat: Salida de la mezcla de refrigerante del evaporador, como vapor saturado.  
 3,sat: Salida de la mezcla de refrigerante del condensador, como líquido saturado.

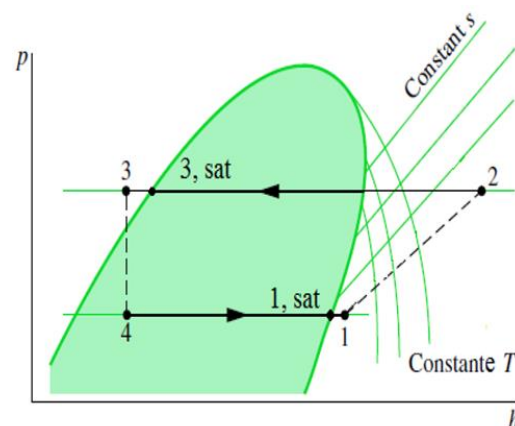


Figura 5. Ciclo de trabajo de una bomba de calor. Tomada de [Cengel Y. y Boles M., 2006](#)



Temperatura de desecho (TREJ), es la temperatura a la que se encuentra la fuente de calor (o calor residual), la cual es de 40 °C.

Temperatura del agua caliente (TAGUA\_Q), temperatura que se desea alcanzar en el sumidero de calor, la cual se encuentra entre 80 y 90 °C.

Rotación del compresor (ROTCOMP), representa la velocidad de rotación del eje del compresor, establecida en 900 revoluciones por minuto (rpm), obtenida a partir del valor nominal, cuyos valores máximos y mínimos de rotación, son de 1300 y 500 rpm. Para efectos del modelo, el valor escogido debe ser ingresado en revoluciones por segundo (rps), siendo este valor equivalente a 15 rps.

Volumen del compresor (VOLCOMP), para el compresor trabajado, el volumen de compresión es de 0,00034 m<sup>3</sup>.

Delta de subenfriamiento ( $\Delta$ SUB) y delta de sobrecalentamiento ( $\Delta$ SUP), son los deltas de subenfriamiento y sobrecalentamiento, establecidos en 5 °C, obtenido a partir del promedio de pruebas experimentales realizadas.

Delta de temperatura de evaporación y de condensación ( $\Delta$ TEVAP) y  $\Delta$ TCOND, respectivamente), corresponden a las diferencias entre la Temperatura media de calentamiento (TMC) y el TAGUA\_Q, y temperatura media de calentamiento (TME) y TREJ.

#### 5.4. Evaluación teórica de mezclas de refrigerantes en una bomba de calor por medio de software

El programa utilizado para la evaluación teórica de las mezclas de refrigerantes, trabaja con la licencia CALL\_EES\_REFPROP®, siendo esta una herramienta que permite comunicar los software EES® y REFPROP® y de esta forma, se logra obtener las propiedades con el software REFPROP® a partir del programa EES®, utilizando el flujograma presentado en la [figura 6](#), donde se observa el procedimiento para la evaluación de las mezclas de refrigerantes en una bomba de calor por compresión de vapor.

Este programa es iniciado con la creación del nombre de la mezcla de refrigerantes, donde es indispensable el ingreso del número de

componentes y el nombre de cada refrigerante o componente puro.

Para la evaluación de las propiedades del fluido, se ingresa el nombre de la mezcla, las fracciones molares de cada uno de los componentes, el delta de temperatura entre el fluido que sede y que gana calor, tanto en el evaporador ( $\Delta$ SUB) como en el condensador ( $\Delta$ SUP), respectivamente; además, se necesita la temperatura a la cual se desea calentar el agua y la temperatura de desecho a utilizar (TREJ) y con el ingreso de esta información, se obtienen las propiedades del flujo.

Se procede con el modelo del compresor, del cual se obtiene el flujo del refrigerante y la relación de presión; se evalúan las propiedades del refrigerante en la descarga del compresor y se evalúa finalmente todo el modelo del sistema, arrojando información como calor de evaporación y de condensación y el COP dentro de los resultados más significativos.

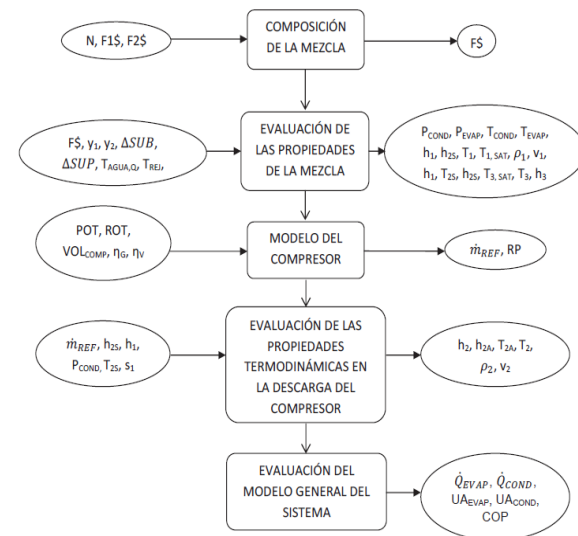


Figura 6. Flujograma detallado para evaluar mezclas teóricas de refrigerantes

## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS TEÓRICAMENTE PARA MEZCLAS DE REFRIGERANTES Y R22

Del estudio teórico realizado de mezclas de refrigerantes para un sistema de bombas de calor, arrojó inicialmente 26 mezclas de refrigerantes que son aptas para alcanzar una temperatura de calentamiento de 80 °C y dieciséis (16) de estas pueden obtener una temperatura de hasta 90 °C.

Para cada una de las mezclas, se consideran todas las posibles combinaciones de las composiciones (fracción molar) de sus componentes puros, logrando así cubrir un amplio rango de mezclas a evaluar, encontrando de esta forma la composición que le atribuye obtener cada parámetro analizado, de igual forma, el refrigerante puro R22 también se evalúa por ser el refrigerante más utilizado en este tipo de sistemas, el cual es usado como referencia para la realización de pruebas y ensayos.

Debido a que la mayoría de las bombas de calor en funcionamiento hoy en día tienen un COP estacionalmente promedio de 2 a 3 (Cengel y Boles, 2006), escogiéndose el valor de 3, como referencia para la selección de las mezclas en la simulación realizada, arrojando de esta forma doce (12) mezclas de refrigerantes con un COP mayor o igual a 3, como se observan en la figura 7, encontrándose el COP en el eje vertical primario y en el eje vertical secundario la composición molar (y1, y2) de cada mezcla.

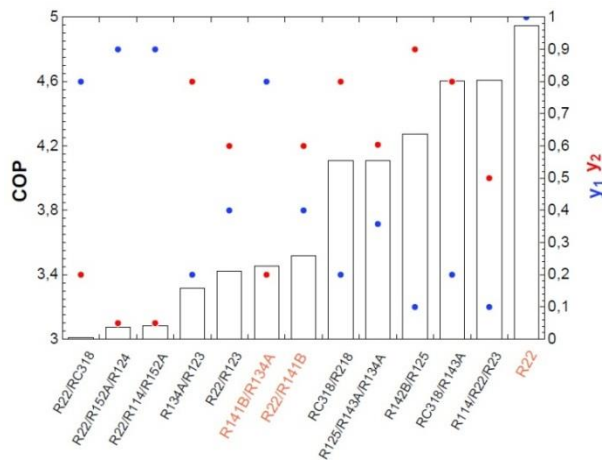


Figura 7. Mezclas de refrigerantes para altas temperatura con un COP ≥ 3

De la figura 7, se observa que existen algunas mezclas, cuyos componentes presentan disponibilidad comercial a nivel regional y nacional, lo cual, posibilita la evaluación y aplicación de estas para apropiación de tecnología, diseño o construcción de este tipo de equipo, estas mezclas de refrigerantes están constituidas por R22/R141b y R141b/R134a. De la figura 7, se analiza que el R22 posee un alto COP, con respecto a las mezcla de interés, pero se debe recordar que el R22 no es apto para altas temperaturas, debido a, que sus propiedades termodinámicas no le permiten alcanzar estas altas temperaturas, pues sus presiones de evaporación y condensación

(Pevap y Pcond) aumentan considerablemente como se observa en la tabla 1.

Para estos valores de COP, se obtienen los valores de potencia que deberán ser suministrados por un calor residual y la potencia que cada mezcla es capaz de ceder para para obtener el calentamiento en el sumidero altas temperaturas, lo cual puede apreciarse en la tabla , obteniéndose para las mezclas de interés (R22/R141b y R141b/R134a) y el refrigerante puro R22, una potencia de condensación de 6971 W, 4258 W y 23930 W, se observa que la potencia necesaria para obtener el calentamiento deseado en el sumidero, es menor para las mezclas que para el refrigerante puro.

Tabla 1. Condiciones de trabajo para diferentes mezclas de refrigerantes

Mezclas de refrigerantes	Qe [W]	Qc [W]	Pevap [kPa]	Pcond [kPa]
R114/R22/R23	28100	34490	1989	4740
R125/R143A/R134A	17330	21890	1423	3568
R134A/R123	3313	4505	161,7	1105
R141B/R134A	3206	4258	142,5	982,8
R142B/R125	17430	21790	1370	3434
R22/R114/R152A	14070	19470	1086	4082
R22/R123	6020	8020	303,8	1762
R22/R141B	5280	6971	245,1	1477
R22/R152A/R124	14210	19690	1096	4138
R22/RC318	11620	16240	959,9	3664
RC318/R143A	15890	19510	1133	2846
RC318/R218	9790	12440	839,4	2173
R22	19800	23930	1192	2997

Una bomba de calor tiene dos niveles de presión, baja (succión) y alta (descarga), la primera se presenta entre la salida de la válvula de expansión y a la entrada del compresor, como se observa en la tabla 1; la segunda, se presenta entre la salida del compresor y la entrada a la válvula de expansión, ver la tabla 1, de lo cual se concluye que las presiones de trabajo tanto de succión como de descarga, difieren considerablemente entre cada mezcla y el fluido de referencia (R22).

Esto es un beneficio al momento de utilizar este tipo de mezclas del interés del proyecto, el cual consiste en que, sus presiones de trabajo en el condensador, y en el evaporador son bajas, con respecto a las necesarias por el R22, siendo para el R22/R141b de 245,1 kPa en el evaporador y 1477 kPa en el condensador, para el R141b/R134a de 142,5 kPa en el evaporador 982,8 kPa en el condensador y de 1192 kPa para el R22 en el

evaporador y 2997 kPa, en el condensador. Dicha situación, beneficia al sistema, principalmente, con su presión de descarga, pues no es recomendable que esta sea un valor alto, para alcanzar las temperaturas deseadas en el sumidero.

## 7. CONCLUSIONES

Se desarrolló de una herramienta matemática que permite identificar mezclas de refrigerantes que cumplan con los parámetros deseados.

Se obtienen teóricamente mezclas de refrigerantes que cumplen con los parámetros deseados, como es el coeficiente de rendimiento (COP), el cual debe ser mayor a 3.

De las simulaciones realizadas, se obtiene que las mezclas de refrigerantes trabajen con bajas presiones, lo cual se presenta como un beneficio para el uso del compresor, pues no se obliga a realizar un trabajo forzado para obtener las temperaturas de trabajo deseadas.

Obtención teórica de dos mezclas de refrigerantes R22/R141b y R141b/R134a, que podrían ser aplicadas en bombas de calor de alta temperatura, por la disponibilidad local de sus componentes, para recuperar calores residuales de baja temperatura.

## AGRADECIMIENTOS

Al grupo de investigación POLO de la UFSC de Florianópolis, S.C., Brasil, y a sus profesores Ph.D Claudio Melo, Ph.D Joaquim Manoel Gonçalves, por brindar la orientación y el apoyo académico necesario para el desarrollo de la herramienta matemática utilizada para este trabajo.

Agradecemos aceptación, aprobación y apoyo brindado para participar con nuestro trabajo en la XX Feria Internacional de Ingeniería INGENIAR UPB 2013, Septiembre 30 – Octubre 4 de 2013, Medellín – Colombia.

## REFERENCIAS

Cátedra BP ahorro y eficiencia energética. Energía en el mundo. Recuperado el 5 de Junio de 2011, de [\[http://catedrabpennergia.uji.es/observatorio/energia-en-el-mundo/\]](http://catedrabpennergia.uji.es/observatorio/energia-en-el-mundo/)

- Cengel, Y. A. & Boles, M. A. (2006). *Termodinámica*, 5th ed. Sao Paulo: McGraw-Hill.
- Huber M. L. & Gallagher J. S., NIST Thermodynamic Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures Database (REFPROP). National Institute of Standards and Technology (NIST), 1996.
- Henderson, P.C., Mongey B & Hewitt, N.J. (2001). Replacing R22 with a hydrocarbon or hydrofluorocarbon. *Int J Energy Res.* 25, 281-90.
- Jakobs, R. & Kruse, H. (1979). The use of non-azeotropic refrigerant mixtures in heat pumps for energy saving. *Int J Refrig*, 2(1), 29-32.
- Johannsen, A.F.B. (1992). Potential of non-azeotropic refrigerant mixtures for water-heating heat pumps in South Africa, Department of Mineral and Energy Affairs, Report Nr. ED 8807, Pretoria, South Africa.
- Kim, TS, Shin, J.Y, Kim, M.S. & Ro S.T. (1994) Cycle analysis and heat transfer characteristics of a heat pump using R22/R142b refrigerant mixtures. *Int J Refrig*, 17(6), 391-9.
- Li, T.X., Guo, K.H. & Wang, R.Z. (2002). High-temperature hot-water heat-pump with non-azeotropic refrigerant mixture HCFC-22/HCFC-141b. *Eng Convers Manage*, 43(15), 2033-2040.
- Martinez, L. G. R. (2007). *Uso de bombas de calor em processos industriais*. Tesis de maestría, Escola Politecnica Universidade de Sao Paulo.
- Nanxi, L., Shi, L., Lizhong, H. & Mingshan, Z. (2005). Moderately high temperature water source heat-pumps using a near-azeotropic refrigerant mixture. *Applied Energy*, 80 (4), 435-447.
- Patel, N. C. & Teja, A. S. (1982). A new cubic equation of state for fluids and fluid mixtures. *Chemical Engineering Science*, 37 (3), 463-473.
- Peng, D. Y. & Robinson, D. B. (1976). A new two constant equation of state. *Industrial Chemical Engineering Fundamentals*, 15 (1), 59-64.
- Radermacher, R. & Hwang, Y. (2005). *Vapor Compression Heat Pumps with Refrigerant Mixtures*. Taylor & Francis.
- Rakesh, B., Venkatarathnam, G & Srinivasa-Murthy, S. (2003). Performance comparison of HFC227 and CFC114 in compression heat pumps. *Appl Therm Eng*, 23, 1559-1566.
- Renon, H. & Prausnitz, J. M. (1968). Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures. *AICHE Journal*, 14, 135-144.

- Shi, L. & Zan, C. (2008). Research methods and performance analysis for the moderate high temperature refrigerant. *Sci China Ser, E Technol Sci*, 51, 1087-1095.
- Smit, F. J. & Meyer, J. P. (1998). Investigation of the potential effect of zeotropic refrigerant mixture on performance of a hot water heat pump. *ASHRAE T*, 104(1), 387-394
- Toro, F., Isaza, C. & Chejne, F. (2007). Uso de las bombas de calor de alta temperatura como alternativa para el uso racional de energía en la industria. *Revista LASALLISTA de Investigación*, 1(2), 28-45.
- Wylen, G. J. V. & Sonntag, R. E. (2003). *Fundamentos da termodinamica*. John Wiley & Sons.
- Zhang, S., Wang, H. & Guo, T. (2010). Experimental investigation of moderately high temperature water source heat pump with non-azeotropic refrigerant mixtures. *Applied Energy*, 87, 1554-1561.

#### SOBRE LOS AUTORES

##### **Farid Chejne Janna**

Ing. Mecánico (UPB, 1983), Físico (U de A; 1989), Doctor en Ingeniería de la universidad Politécnico de Madrid, España (1991), Postdoctorado de la Universite Libre De Bruxelles, Bélgica (1997). Actualmente, es el director del Grupo de Estudios en Energía y del Grupo Termodinámica Aplicada y Energías Alternativa-TAYEA de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional, en Medellín. Para observar su Curriculum Vitae, entrar al site de Colciencias [[http://201.234.78.173:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0000044008](http://201.234.78.173:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000044008)].

##### **Cesar Alejandro Isaza Roldán**

Ing. Mecánico (UPB, 1994), Especialista en gases de combustión (UPB, 1998), Doctor en Ingeniería (UPB, 2008). Actualmente, es Docente Investigador del Centro de Investigación, Desarrollo y Calidad en Refrigeración y Climatización – CIRCLI de la facultad de Ing. Mecánica. Para observar su Curriculum Vitae ingresar al site de Colciencias [[http://201.234.78.173:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0000044121](http://201.234.78.173:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000044121)].

##### **Mónica Marcela Omaña Yáñez**

Ing. Agroindustrial (UPB, 2009), Egresada no graduada y aspirante al título de Magister en Ingeniería, área Sistemas energéticos. Auxiliar de investigación en el proyecto de investigación del proyecto “Implementación de un secador solar híbrido para el aprovechamiento de la citropulpa como materia prima en alimentos concentrado para animales” (2008-2009). Colaboradora en la sección experimental del proyecto de investigación “Estudio de la Cinética de Secado de Residuos Agroindustriales y Evaluación del Efecto de la Temperatura Sobre las Propiedades Funcionales de la Fibra Dietaria Presente” (2009-2010). Auxiliar de investigación del proyecto “Sistemas de recuperación de energía con tecnologías de bombas y tubos de calor en procesos industriales” (2010-2012). Docente de cátedra de la facultad de Ing. Agroindustrial de la UPB (2009-2012). Pasante de investigación de mezclas de refrigerantes, sistemas de bombas de calor y manejo de software en la UFSC en la ciudad de Florianópolis, S.C, Brasil (2011).