

ANÁLISIS Y ESTUDIO DE DISPOSITIVOS DE EXPANSIÓN EN CICLOS DE REFRIGERACIÓN Y SU INFLUENCIA EN EL COEFICIENTE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE CÁLCULO ANALÍTICO, SIMULACIONES Y ENSAYOS EXPERIMENTALES EN UN LABORATORIO DE CO₂

REFRIGERATION CYCLES EXPANSION ANALYSIS AND STUDY AND THEIR INFLUENCE ON THE ENERGY EFFICIENCY COEFFICIENT BY COMPARING ANALYTICAL CALCULATION, SIMULATIONS AND EXPERIMENTAL TESTS IN A CO₂ LABORATORY

Univ. Alejandra Arevalo Kollros (1)

RESUMEN

En este trabajo se realizó un análisis y estudio sobre la influencia que tienen los dispositivos de expansión en el Coeficiente de Eficiencia Energética en los ciclos de refrigeración por compresión de vapor, ya que este tipo de instalaciones destinadas a la producción del frío que emplean este tipo de ciclos suponen un alto porcentaje de consumo energético.

El estudio principalmente usó modelos matemáticos con los cuales se puede simular y predecir su comportamiento por medio de un análisis en el cambio de sobrecalentamiento, y su influencia en el coeficiente de eficiencia energética. Se compararon dos tipos de válvulas electrónicas de expansión: la pulsante y la continua, mediante simulaciones realizadas con el software para refrigeración CoolPack; cálculos analíticos y la ejecución de ensayos experimentales; sabiendo que

para lograr una reducción energética se debe tener una operación próxima al límite de eficiencia termodinámica.

Palabras clave: Ciclos de compresión de vapor. Válvulas de expansión. Simulaciones. Coeficiente de Eficiencia Energética. Sobrecalentamiento.

ABSTRACT

This paper presents an analysis and study performed on the influence of the expansion devices in the coefficient of energy efficiency in vapor compression refrigeration cycles, since this type of facilities for cold production of cold using this type of cycles represents a high percentage of energy consumption.

The study used mathematical models which can simulate and predict their behavior through an analysis on

Páginas 57 a 65

Fecha de Recepción: 05/09/16

Fecha de Aprobación: 12/09/16

1) Estudiante de la carrera de Ingeniería Electromecánica, Univalle Cochabamba. aleak91@hotmail.com

the change of overheating, and its influence on the energy efficiency coefficient. Two types of electronic expansion valves were compared: the pulsed and continuous, through simulations with the software for refrigeration CoolPack; analytical calculations and execution of experimental tests; knowing that to achieve an energy reduction next operation should have a limit of thermodynamic efficiency.

Keywords: Vapor compression cycles, Expansion valves, Simulations, Energy Efficiency Ratio, Super-heat

INTRODUCCIÓN

Actualmente, nuestra sociedad se encuentra en un desarrollo progresivo tecnológico en el campo de los sistemas de refrigeración y aire acondicionado, y paralelamente los temas de ahorro energético (consumo racional y moderado de energía) y la protección del medioambiente han ido tomando cada vez más importancia, de modo que ya no solo basta con el empleo de sistemas convencionales de refrigeración, sino que también, hoy en día la búsqueda de sistemas cada vez más eficientes energéticamente se convirtió en la prioridad número uno, es decir, que surgió también un mayor énfasis en la eficiencia del sistema y controles modernos (1) (2).

El calentamiento global se ha convertido en un problema medioambiental mayor; cuando los sistemas HVAC/R funcionan de manera adecuada y eficiente, se logra reducir el consumo de energía y los gases de efecto invernadero (2).

Conseguir una expansión en el uso de energía renovable solo puede ser por medio de una reducción en el consumo de energía eléctrica, mejorando la eficiencia energética es una parte esencial de esto. Los sistemas de refrigeración y aire acondicionado cuentan alrededor del 15% del consumo de electricidad final por lo que este parece ser un sector prometedor en cuanto al potencial para obtener un mayor ahorro energético. Hasta ahora, los aspectos de eficiencia energética han sido abarcados con poca consideración en la construcción de estos sistemas. Aunque estas soluciones energéticamente eficientes son costosas estas pueden llegarse a pagar durante todo su ciclo de vida; los conceptos de ciclo de vida de un sistema juegan una parte significativa (3) (4).

La idea de desarrollar el presente trabajo surge debido a la necesidad de investigar cuál es la influencia de las válvulas de expansión sobre el coeficiente de eficiencia energética EER de los sistemas de refrigeración; el objeto de estudio del proyecto se centrará en

obtener una visión global sobre las funciones, principios de funcionamiento y requerimientos de las válvulas de expansión para una lograr una operación eficiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo está basado principalmente de una comparación entre la realización de cálculos analíticos, fundamentalmente en el área de termodinámica y transferencia de calor para el ciclo de compresión de vapor para las series propuestas (5) (6), así como también de la realización de simulaciones en el software de refrigeración Coolpack (el cual cuenta con una interfaz que permite al usuario ingresar los principales parámetros en un ciclo de refrigeración, así como también el cálculo de las propiedades restantes para dichos puntos mediante determinados modelos matemáticos, y así mostrar en un diagrama P-h del ciclo de refrigeración ingresado pudiendo simular el comportamiento de los modelos propuestos), y así también, la ejecución de ensayos experimentales en un laboratorio de CO₂ en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Zúrich (ZHAW) (5) (6) (7), el cual está principalmente compuesto de los siguientes elementos, los cuales son mostrados en la Figura N° 1:

Figura N° 1. Vista general: máquina de refrigeración CO₂

Fuente: (8).

• **El compresor principal:** de tipo recíprocante, semi-hermético de marca Bitzer, modelo 4MTC-10K-40S.

• **Evaporador:** intercambiador de calor que consiste en placas delgadas y corrugadas de acero inoxidable apiladas una sobre otra, de marca Alfa Laval, modelo

CBXP52-60MDS-F que está especialmente diseñado para aplicaciones de refrigeración con CO₂.

• **Condensador:** de características similares a las del evaporador, de marca Alfa Laval, modelo AXP52-50H-F.

• **Dos válvulas de expansión electrónicas de modulación de ancho pulsante:** modelo Danfoss AKV10-6 y una válvula de expansión electrónica de modulación continua modelo Danfoss CCM 10 CO2 MP.

• **Sistema de adquisición de datos:** para la recolección electrónica de datos se hace empleo de un componente básico de National Instruments "CompactDAQ-Chassis".

• Sensores de temperatura PT100.

• Medidores de presión PA-33x.

• Medidores del flujo de masa del refrigerante de Endress Hauser Promass 83F.

• Medidores del flujo volumétrico del fluido secundario de Endress Hauser Promag 53H.

• Medidores de potencia eléctrica Sineax M563 (9).

Gracias al sistema de adquisición de datos, éste permite su control y visualización mediante el uso de LabVIEW, que se encarga de almacenar los datos en archivos Excel, pero también se cuenta con un programa de Matlab, llamado RAD, sencillo de manejar y dinámico, ya que permite seleccionar parámetros que el usuario desea observar y evaluar, además es capaz de leer dichos datos y elaborar gráficas del proceso completo, así como también es capaz de analizar periodos de tiempo específicos y determinar los parámetros medidos junto a sus respectivas desviaciones estándares (10) (11) (12).

Para la determinación de los parámetros de estudio de cada una de las series propuestas se realizaron ciertas consideraciones:

• Se decidió mantener constante un parámetro y así observar el comportamiento del EER en diferentes puntos de estudio; el parámetro constante fue la temperatura de evaporación. Se decidió escoger $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, porque usualmente las temperaturas normales de operación en el evaporador en un congelador son entre $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ dependiendo de la aplicación (13).

• Se decidió variar la temperatura de condensación para ir variando la potencia eléctrica, ya que al mantener la temperatura de evaporación constante también la presión se mantiene constante y con el incremento de la temperatura de condensación también se incrementa la diferencia de presiones cau-

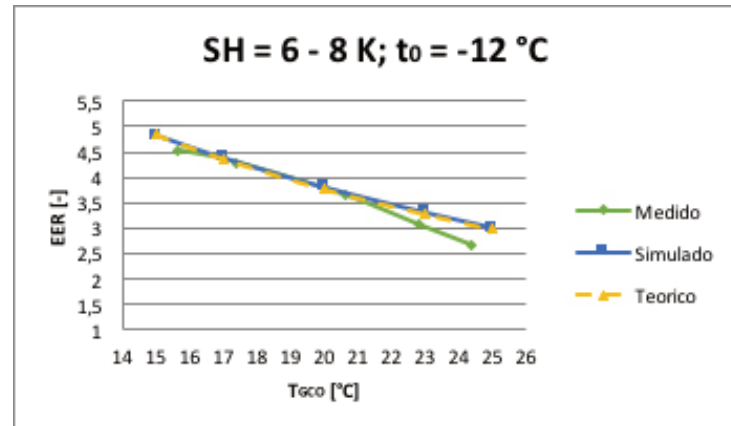
sando un trabajo de compresión (13) (14).

• Se decidió trabajar con tres diferentes rangos de sobrecalentamiento (6-8 K, 9-11 K y 12-14 K) basados en los límites superiores e inferiores según permite el software de control "Danfoss Tool", y la razón por la cual no son rangos muy amplios es para que la incertidumbre sea menor, ya que el controlador se ajusta de forma automática de acuerdo al grado de sobrecalentamiento que el sistema necesite (15) (16).

RESULTADOS

Con los datos y resultados obtenidos en el cálculo analítico, las simulaciones en Coolpack y los ensayos experimentales realización en el laboratorio de refrigeración, se procedió a la realización de gráficas comparativas para así observar la variación o dispersión entre dichos valores. Las primeras tres gráficas mostradas corresponden a los estudios realizados con la válvula de expansión electrónica continua (17) (18).

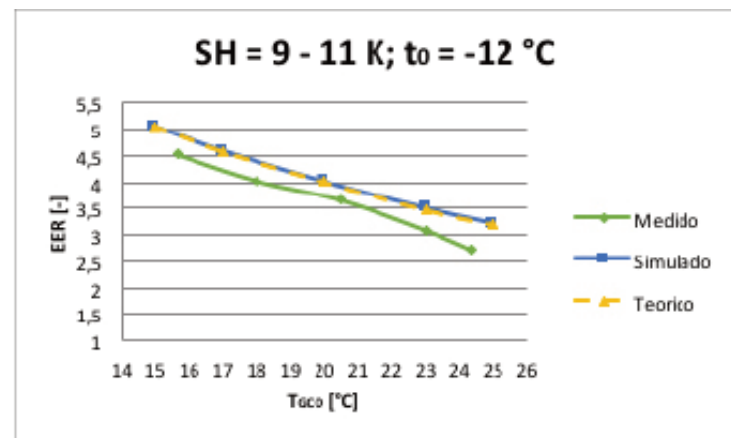
En la Figura N° 2 se compara un cálculo teórico y los ciclos simulados en el Coolpack y los datos obtenidos en el banco de ensayos de la máquina de CO2. Tal como se puede observar los valores del ciclo simulado y teórico tienen casi ninguna variación en contraste con los datos medidos, que si bien tienen una leve variación, estos son bastante cercanos con el ciclo teórico, en especial para temperaturas de condensación de $17 - 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, para esta serie el mayor Coeficiente de Eficiencia Energética obtenida en el ciclo real fue 4,526 para una $T_{gco} = 15,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (19).

Figura N° 2. Comparación ensayos vs simulaciones vs cálculo analítico: Sobrecalentamiento 6 – 8 K

Fuente: Elaboración propia. 2015.

Para las series con sobrecalentamiento = 9 – 11 [K], los ciclos teóricos y simulados tienen una varianza mínima, mientras que el ciclo medido real si bien está

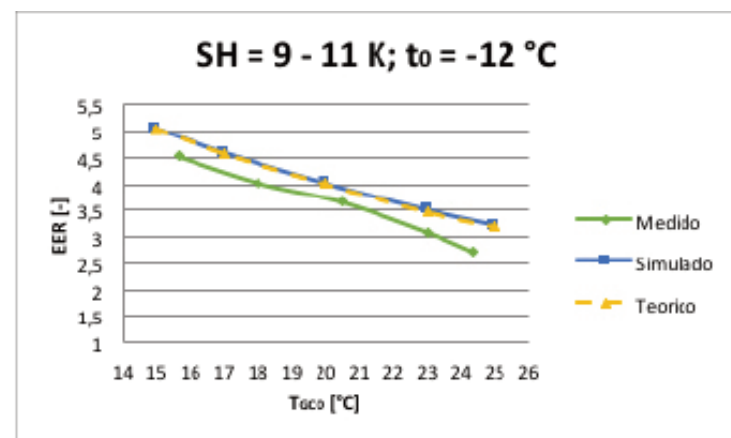
más alejado de los parámetros teóricos, la trayectoria de la curva sigue la curva de los ciclos teóricos y simulados, tal como se muestra en la Figura N° 3.

Figura N° 3. Comparación ensayos vs simulaciones vs cálculo analítico: Sobrecalentamiento 9 – 11 K

Fuente: Elaboración propia. 2015.

En la Figura N° 4 se puede observar y comprobar que con un rango de sobrecalentamiento mayor se obtuvo un mayor valor del Coeficiente de Eficiencia Energética

en relación a las series de 6-8 [K] y 9-11 [K], y que además la curva de los valores medidos es bastante cercana a la curva teórica (19).

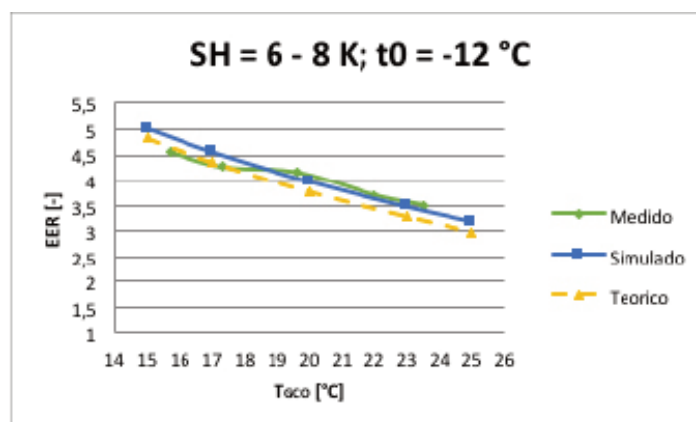
Figura N° 4. Comparación ensayos vs simulaciones vs calculo analítico: Sobrecalentamiento 12-14 K

Fuente: Elaboración propia. 2015.

Las Figuras N° 5, 6 y 7 corresponden a los ensayos realizados para la válvula de expansión electrónica pulsante; al igual que el apartado anterior, se realizó una comparación solo que haciendo uso de la válvula pulsante (17) (18). Tras la realización de los ensayos experimentales, simulaciones y cálculo analítico de los ciclos propuestos empleando la válvula pulsante, se observa de igual manera que a medida que se va in-

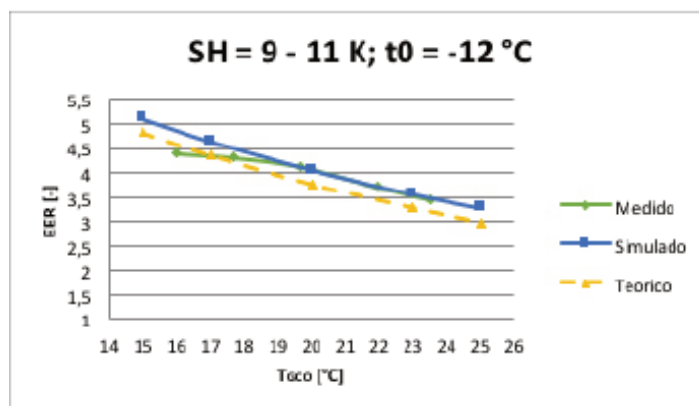
crementando el rango del sobrecalentamiento a la salida del evaporador según se va variando la apertura de la válvula se van obteniendo mayores valores para el EER, pero la desventaja de este tipo de válvula es que si bien sus valores obtenidos en la máquina de refrigeración de CO₂ son bastante cercanos a los de las curvas teóricas y simuladas.

Figura N° 5. Comparación ensayos vs simulaciones vs cálculo analítico: Sobrecalentamiento 6 – 8 K

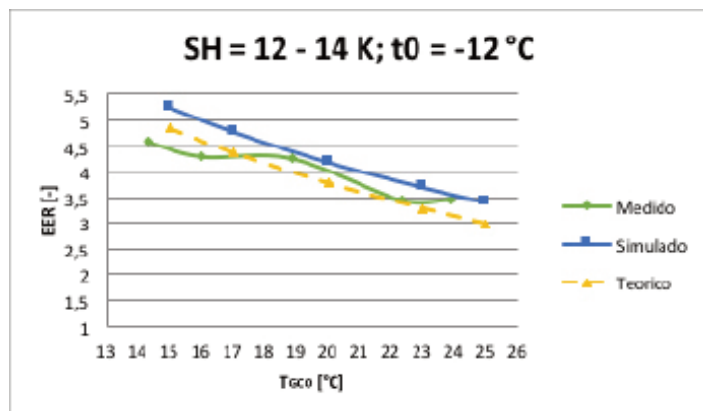


Fuente: Elaboración propia. 2015.

Figura N° 6. Comparación ensayos vs simulaciones vs cálculo analítico: Sobrecalentamiento 9 – 11 K



Fuente: Elaboración propia. 2015.

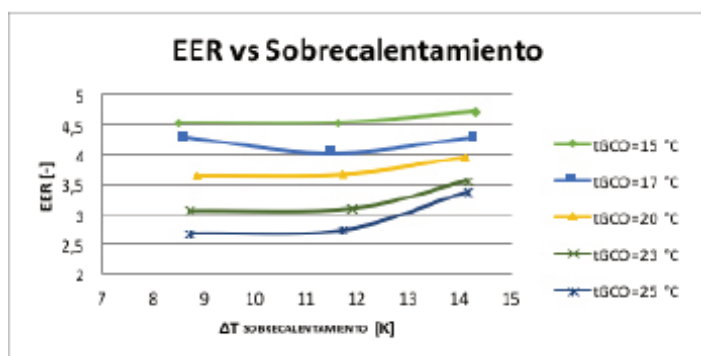
Figura N° 7. Comparación ensayos vs simulaciones vs cálculo analítico: Sobrecalentamiento 12-14 K

Fuente: Elaboración propia. 2015.

Además, se realizaron gráficas comparativas entre la válvula de expansión electrónica continua y la válvula de expansión electrónica pulsante para cada una de las series estudiadas, un ejemplo de éstas es la Figura N° 8 (17) (18), en la cual se puede observar e interpretar que las series en las que se empleó la válvula de expansión eléctrica continua, no solo demuestra una mayor precisión para alcanzar los rangos de sobrecalentamiento especificados en el controlador Danfoss de la máquina de refrigeración, sino que también muestra una mayor estabilidad ante dichos cambios en comparación con las series que emplean la válvula pulsante que demostraron no llegar a los valores designados de sobrecalentamiento y presentaron una gran inestabilidad.

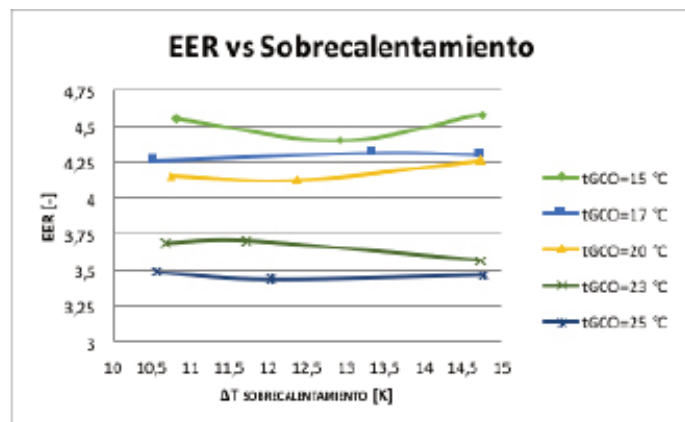
Por último, se realizaron dos gráficas que describen el comportamiento de los dos tipos de válvulas de expansión empleadas. La Figura N° 7 demuestra que se logró obtener mayores valores de EER para las diferentes series propuestas, tan solo variando la diferencia de temperatura (controlada por las válvulas de expansión) a la salida del evaporador, el mayor Coeficiente de Eficiencia Energética obtenido en los ensayos realizados fue de 4.722 para la serie con una temperatura de condensación de 15 [°C] (17) (18).

Una notoria particularidad para esta gráfica es que la característica que presentan las curvas es que son relativamente similares a medida que se van variando las series.

Figura N° 8. Cambio del EER frente al sobrecalentamiento (válvula continua)

Fuente: Elaboración propia. 2015.

Figura N° 9. Cambio del EER frente al sobrecalentamiento (válvula pulsante)



Fuente: Elaboración propia. 2015.

En la Figura N° 9 se muestra de igual forma que la gráfica anterior, la relación entre el ΔT de sobrecalentamiento y el EER para diferentes temperaturas de condensación; también se puede apreciar que las curvas no presentan la misma uniformidad que presentan durante el empleo de la válvula continua, además que también se obtuvieron menores valores de EER para los mismos parámetros establecidos (20).

DISCUSIÓN

- Se realizó una descripción de los elementos que componen a la máquina de refrigeración de CO₂ de la ZHAW, así como también poder estudiar en los procesos del ciclo de refrigeración por compresión de vapor, cuyo refrigerante amigable con el medio ambiente, debido a sus buenas propiedades termodinámicas tiene una incidencia en la destrucción de la capa de ozono de 0 y con un potencial de calentamiento global de 1 (21) (22).

- Se efectuaron ensayos experimentales en un laboratorio de refrigeración completo, los resultados obtenidos gracias a un sistema de adquisición de datos sirvieron luego para la realización de la comparación entre el cálculo analítico y las simulaciones realizadas con el software de refrigeración Coolpack.

- Hacer el uso de las válvulas de expansión electrónicas continuas debido a las ventajas mencionadas además este tipo de válvulas demostraron tener mayor estabilidad en respuesta al cambio de parámetros en el controlador de la máquina de refrigeración, y además no se tiene el riesgo de dañar las tuberías por el constante cierre y apertura como es el caso de las válvulas pulsantes (17) (18).

- Usar de intercambiadores de calor tanto a la salida del evaporador como a la salida del condensador para así garantizar vapor y líquido respectivamente para mejorar la eficiencia del sistema.

- Usar de válvulas de expansión eléctricas continuas, debido a que estas tienen una mejor estabilidad, también se recomienda también tener un cierto valor de sobrecalentamiento ya que de esta manera se obtuvo un EER mayor en las series de 12-14 [K] (18).

- Análisis y estudio de dispositivos de expansión en ciclos de refrigeración y su influencia en el Coeficiente de Eficiencia energética "EER", mediante la comparación del cálculo analítico, simulaciones y ensayos experimentales en un laboratorio de CO₂.

- Se realizó la comparación entre la válvula de expansión eléctrica continua y la válvula de expansión eléctrica pulsante, se pudo demostrar y concluir que la válvula de expansión eléctrica continua logra un mayor índice de eficiencia energética a un determinado valor de temperaturas de condensación (es decir, que cuando hay una menor diferencia de presiones entre el condensador y el evaporador), así como también muestra una mayor estabilidad al momento de realizar un cambio o ajuste en el valor de la diferencia de temperaturas de sobrecalentamiento.

AGRADECIMIENTOS

Un sincero agradecimiento a la Universidad de Ciencias Aplicadas de Zúrich ZHAW, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de realizar el presente proyecto, a mis tutores Prof. Dr. Frank Tilkamp, BSc. Markus Krütti y al Ing. Raúl Terán por todos sus consejos y conocimientos con los cuales fue posible la realización del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) W. WHITMAN, W. JOHNSON, J. TOMCZYK Y E. SILBERSTEIN, Refrigeration & air conditioning technology, 7th ed., New York: Delmar, Cengage Learning, 2012.
- (2) A. RAMESH, Refrigeration and air conditioning, Nueva Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010.
- (3) L. PEREZ-LOMBARD, J. ORTIZ Y C. POUT, «A review on buildings energy consumption information,» Elsevier, pp. 394-398, 2007.
- (4) SWISS FEDERAL OFFICE OF ENERGY, «Bundesaamt für Energie,» 17 Noviembre 2013.
- (5) P. WEISSENBORN, «Energie sparen in der gewerbetälte,» Berlín, 2008.
- (6) S. TURNS, Thermodynamics: Concepts and Applications, Nueva York: Cambridge University Press, 2006.
- (7) G. J. V. WYLEN, Fundamentos de termodinámica, 2nd ed., Michigan: Limusa Wiley, 2000.
- (8) ZHAW-IEFE, Übersicht von Hydrauliksystemen, Winterthur, 2014.
- (9) ZHAW-IEFE, Organisation der Informatiksysteme im Kältelabor TM U1.42, Winterthur, 2014.
- (10) P. CHAIWONGSA Y S. WONGWISES, «Experimental study on R-134 refrigeration system using a two phase ejector as an expansion device,» Elsevier Ltd., 2007.
IKET, (Hrsg.), Pohlmann Taschenbuch der Kältetechnik, 21th ed., Berlin: VDE Verlag, 2013.
- (11) I. BELL, «Performance Increase of carbon dioxide Refrigeration Cycle with the Addition of Parallel Compression Economization,» de 6th IIR Gustav Lorenzen Natural Working Fluids, September 2004.
- (12) S. GIROTTO, «Refrigeration systems for warm climates using only CO₂ as a working fluid,» Natural refrigerants - Sustainable ozone- and climate-friendly alternatives to HCFCs, pp. 287-301, 2008.
- (13) M. LAPUERTA Y O. ARMAS, Frío industrial y aire acondicionado, Real: Universidad de Castilla-La Mancha, 2012.
- (14) O. HOUGEN, K. WATSON Y R. RAGATZ, Principios de los procesos químicos: Termodinámica, vol. II, Barcelona: Reverte, 2005.
- (15) BUNDESAMT FÜR ENERGIE BFE, «Wärmepumpen und Kälte,» de Energieforschung 2012, Bern, 2012.
- (16) M.-H. KIM, J. PETTERSEN Y C. W. BULLARD, «Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems,» Progress in energy and combustion science 30, pp. 119-174, 2004.
- (17) SPORLAN, «Válvulas de expansión termostática,» Parker Hoffin Corporation, Washington, 2006.
- (18) SPORLAN, «Válvulas de expansión eléctricas,» Parker Hoffin Corporation, Washington, 2010.
- (19) TEP ENERGY GMBH, PROGNOSE AG, INFRAS AG, «Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2013 nach Verwendungszwecken,» 2014.
- (20) ALFA LAVAL, «Heating and cooling solutions from Alfa Laval,» 2012-2013.
- (21) P. RAPIN Y P. JACQUARD, Instalaciones frigoríficas, vol. II, Barcelona: Marcombo S.A., 1997.
- (22) ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION Y ENERGY INTERNATIONAL OUTLOOK, «Monthly Energy Review,» 2014.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Handbook: Refrigeration, Atlanta, 10.

D. Korn, Effizienter Betrieb von Kälteanlagen, Berlin: VDE Verlag, 2011.

J. P. Holman, Transferencia de Calor, Madrid: McGraw Hill, 1998.

P. Alcalde San Miguel, Electrónica 2 Bach, Madrid: Editorial Paraninfo, 2011.