

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA ANALIZAR UN SISTEMA EXPERIMENTAL DE REFRIGERACIÓN USANDO HOJAS DE CÁLCULO

Juan Manuel Mendoza-Miranda¹, Juan Manuel Belman-Flores¹, Armando Gallegos-Muñoz¹, Adrián Mota-Babiloni² y Joaquín Navarro-Esbri²

¹ UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO. División de Ingenierías. Campus Irapuato-Salamanca. Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8 - 36885 Comunidad de Palo Blanco. Salamanca (México). Tel.: +52 464 6479940. jfbelman@ugto.mx

² UNIVERSIDAD JAUME I. Dpto. de Ingeniería Mecánica y Construcción. Campus Riu Sec, s/n - 12071 Castellón.

Recibido: 28/07/2014 - Aceptado: 18/09/2014 - DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7255>

COMPUTATIONAL TOOL FOR EXPERIMENTAL REFRIGERATION SYSTEM ANALYSIS USING SPREADSHEETS

ABSTRACT:

This paper presents a spreadsheet application for data filtering and energy analysis, which has applications in research and experimental evaluation of the energetic performance of alternative refrigerants. Experimental vapor compression system (refrigeration system) generate a large amount of data, which is stored in text files of variable size. Text files contain different parameters such as: temperature, pressure, mass flow rate and power consumption, measured at the inlet and outlet of each component of the test bench. This computational tool processes information using spreadsheet functions and programming in Visual Basic for Applications (VBA) capabilities as well as the connection with the REFPROP dynamic libraries for thermophysical properties of refrigerants. The resulting application is user friendly (for engineering students, researchers, etc.), even without VBA programming and interaction of dynamic libraries of REFPROP knowledge by the user.

Keywords: steady state, data analysis, graphical visualization, spreadsheets, vapor compression system.

RESUMEN:

Este trabajo presenta una aplicación de hojas de cálculo para el filtrado de datos y análisis energético, el cual tiene su aplicación en la investigación y evaluación experimental del desempeño energético de refrigerantes alternos. El sistema experimental de compresión de vapor (sistema de refrigeración) genera una gran cantidad de datos, que son almacenados en archivos de texto de tamaño variable.

Los archivos de texto contienen diferentes parámetros como: temperatura, presión, flujo másico y consumo energético, estas medidas se toman a la entrada y salida de cada componente del banco experimental. La herramienta computacional desarrollada procesa la información usando las funciones de las hojas de cálculo y programación en Visual Basic para aplicaciones (VBA), así como la conexión con las librerías dinámicas del REFPROP para las propiedades termo-físicas de los refrigerantes. Resulta una aplicación amigable para el usuario (estudiantes de ingeniería, investigadores, etc.), incluso sin que el usuario tenga la necesidad de programar en VBA y sin conocimiento e iteración con librerías dinámicas del REFPROP.

Palabras clave: estado estable, análisis de datos, visualización gráfica, sistema de compresión de vapor.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación y evaluación energética experimental de refrigerantes alternos con bajo *potencial de calentamiento global* (GWP, por sus siglas en inglés) en el campo de la refrigeración, juega un papel importante debido a cuestiones ambientales en los últimos años. Investigación experimental en este campo se lleva a cabo en muchas Universidades y centros de investigación que cuentan con sistemas de compresión de vapor. El banco experimental de refrigeración que se utiliza para este propósito genera grandes cantidades de datos debido a la amplia gama de condiciones de operación que se pueden estudiar. Por lo tanto, el filtrado y análisis de los datos experimentales recogidos es un gran desafío, es una tarea que necesita mucho tiempo y requiere del uso de software especializado, un solo archivo de datos puede

contener gran información de transitorios y datos estables bajo diferentes combinaciones de condiciones de operación de la instalación. Una solución a este problema es el desarrollo de software computacional que va a resultar en una herramienta viable para completar con éxito la tarea. Entre todos los programas disponibles, Microsoft Excel® es una opción válida basada en hojas de cálculo que se puede utilizar para este propósito. En los últimos años, Excel se ha convertido en una plataforma de desarrollo junto a los basados en C++, Java y .NET [1]. A pesar de que la utilización de las hojas se destina en su mayoría para su uso en la contabilidad empresarial [2], la ubicuidad y la sencillez de Excel, además de su amplia biblioteca de funciones integradas, por ejemplo, para trazar las capacidades y otras utilidades incorporadas, ha hecho un instrumento atractivo para la ingeniería, así como para otras disciplinas.

En el *open source* literatura, muchos artículos con la utilización de las hojas de cálculo se pueden mencionar. Por ejemplo, Lowry y Thomas [3] utilizan hojas de cálculo para estimar la luminancia de día en un cuarto usando el primer principio para el cálculo de luminancias y propiedades del material de los cristales. El modelo resultante se puede utilizar para analizar el efecto de alterar las propiedades y condiciones de cielo sin software especializado. Ayala et al. [4] desarrollaron aplicaciones de las hojas de cálculo para procesar grandes archivos del EEG. Esto se tradujo en una aplicación con visualización tabular, herramientas de procesamiento de tabla y la posibilidad de subdividir las tablas cuando los requisitos de memoria exceden la capacidad. Cheetancheri y Cheng [5] presentaron una aplicación del análisis del mecanismo y animación. Esta aplicación permite a los usuarios desarrollar y resolver problemas complicados de mecanismos planares. Aliane [6] estudió la posibilidad de interconectar Excel con hardware externo, y demostrar el uso de lenguaje de programación VBA para realizar adquisición de datos y control en tiempo real. Iglesias et al. [7] presentan un simulador elemental de procesos químicos (SimPro) desarrollado en Excel VBA asociado con lenguaje de programación. La aplicación permite realizar balances de energía y masa, dimensiones del equipo y evaluaciones de costos. Morishita et al. [8] demostraron que las ecuaciones de la dinámica de los fluidos pueden ser resueltas con eficacia utilizando hojas de cálculo. Aquí, se presentan tres problemas típicos con *Hojas de la Dinámica de Fluidos* (FSD, por sus siglas en inglés), hojas de cálculo convencionales, inversa de la matriz del producto vectorial, funciones e iteración. Jordania [9] utiliza hojas de cálculo para resolver problemas de radiación térmica especialmente relacionadas con múltiples cajas de superficie. Llegó a la conclusión de que las hojas ofrecen una cómoda y flexible herramienta para resolver estos problemas.

Como se muestra en la revisión de la literatura, no hay registro en el uso de Excel para la experimentación y el análisis del filtrado de datos aplicado a sistemas experimentales de compresión de vapor. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo está orientado hacia el desarrollo de un simple y fácil uso de aplicación de hojas de cálculo para el análisis energético y filtrado de los datos experimentales obtenidos de una planta de compresión de vapor, esto en la investigación de nuevos refrigerantes alternos. Esta aplicación tiene la ventaja de varias funciones para hojas de cálculo como programación de macros, fórmulas de celda, así como su conectividad con bibliotecas dinámicas de propiedades termofísicas de fluidos. Como resultado de ello, la aplicación es una herramienta útil para evaluar el rendimiento energético y filtrado de datos para una gran variedad de condiciones de operación y tipos de refrigerantes.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el banco experimental de prueba utilizado, así como una descripción del sistema de medición. La sección 3 presenta la estrategia y las necesidades de la aplicación, así como la formulación de los parámetros clave para analizar el rendimiento del sistema. En la sección 4 se presentan las funciones de las aplicaciones a través de un ejemplo que ilustra dicha aplicación; por último, se resumen las principales conclusiones.

2. BANCO EXPERIMENTAL DE PRUEBAS

El sistema experimental de refrigeración (basado en tecnología de compresión de vapor) que se ha utilizado para obtener los datos experimentales se muestra en la Fig. 1. La planta experimental se encuentra en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción de la *Universidad Jaume I*, España.

La herramienta computacional que se desarrolló en el presente trabajo pretende reforzar la comprensión de los sistemas de refrigeración y explicar de mejor manera el manejo de los datos, así como en la enseñanza en el campo de la refrigeración y a la investigación aplicada con la colaboración internacional entre los grupos de investigación universitarios.

El banco de pruebas consta de tres circuitos: circuito de compresión de vapor y dos circuitos secundarios para simular cargas diferentes de refrigeración y condensación. El circuito de compresión de vapor pueden trabajar en dos configuraciones diferentes: como una sola etapa de compresión de vapor (simple) y compresión de vapor con un

intercambiador intermedio de calor (IHX). La configuración del sistema de refrigeración está controlada por un sistema que automáticamente abre o cierra las válvulas.

En la Fig. 2, se muestra un esquema con la ubicación de las válvulas de control sobre la configuración del sistema, así como la ubicación de la instrumentación para reunir los datos experimentales. Los principales componentes de la planta de compresión de vapor son: compresor, condensador, válvula de expansión, intercambiador de calor intermedio y el evaporador. El compresor que se utiliza es un tipo abierto de velocidad variable; un evaporador tipo carcasa-tubos está montado, donde el refrigerante circula por dentro de los tubos y una salmuera agua-glicol de propileno (35/65 % en volumen) que se utiliza como un fluido secundario; incluye también un condensador carcasa-tubos, donde el fluido fluye a lo largo de la carcasa y el agua por dentro de los tubos concéntricos; un tubo corrugado como intercambiador de calor intermedio donde el refrigerante líquido pasa por la parte anular y el vapor refrigerante fluye dentro del tubo interno, y un conjunto de válvulas de expansión. El sistema experimental se complementa con dos circuitos secundarios utilizados para controlar las condiciones del fluido secundario en la entrada del evaporador y en el condensador para simular y controlar las diferentes condiciones de trabajo para el sistema de refrigeración.

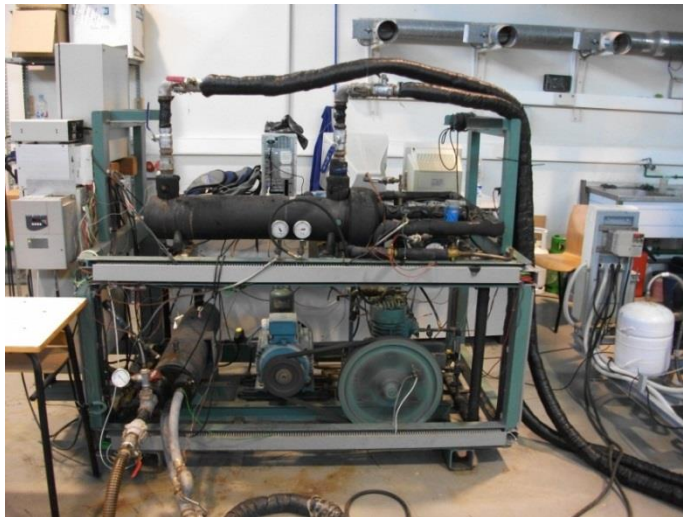


Fig. 1: Banco de ensayos experimental

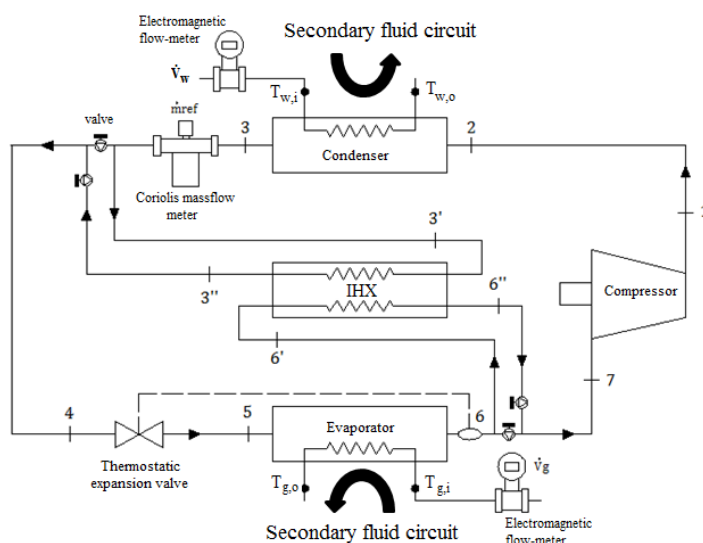


Fig. 2: Sistema de compresión de vapor

Cabe mencionar que en el banco experimental se pueden hacer cambios en sus elementos principales, por ejemplo, cambios en los intercambiadores de calor, así como cualquier otro compresor volumétrico. Sin embargo, para los efectos de la herramienta desarrollada y presentada en este trabajo, sólo cambios en la configuración de la instalación se tienen en cuenta.

2.1. SISTEMA DE MEDICIÓN

Los principales estados termodinámicos se muestran en la Fig. 2, los cuales se obtienen midiendo la temperatura y la presión en la entrada y la salida de cada elemento de la instalación mediante termopares y transductores de presión piezoeléctricos, respectivamente. Los termopares se calibran en nuestro propio laboratorio con certificación de referencias con una incertidumbre de $\pm 0,3$ K, mientras que los transductores de presión dentro de un rango de 0-3 MPa tienen una incertidumbre de $\pm 0,1$ %. La medición de flujo másico del refrigerante, $\dot{m}_{ref}$, se obtiene por medio de caudalímetro efecto Coriolis situado en línea de líquido, con una precisión de $\pm 0,22$ % de la lectura. El caudal volumétrico de los fluidos secundarios en el evaporador y el condensador, $\dot{V}_w, \dot{V}_g$ se miden utilizando caudalímetros electromagnéticos con una precisión de $\pm 0,25$ %. Todos estos parámetros medidos son esenciales para obtener el resto de las propiedades termofísicas mediante la base de datos del REFPROP [10]. En la Tabla I se resumen las variables medidas y el tipo de instrumento de medición utilizados en los diferentes circuitos de la planta experimental.

Circuito	Variables a medir	Tipo de Sensor	Número de sensores	Incertidumbre
Circuito de compresión de vapor	T	Termopar de tipo K	12	$\pm 0,3$ K
	P	Transductores de presión	8	$\pm 0,1$ %
	$\dot{m}_{ref}$	Medidor efecto Coriolis	1	$\pm 0,22$ %
	Pot_c	Wattímetro digital	1	$\pm 0,5$ %
	N	Sensor inductivo	1	± 1 %
Circuitos secundarios	T	Termopares de inmersión	4	$\pm 0,3$ K
	$\dot{V}_w, \dot{V}_g$	Caudalímetro electromagnético	2	$\pm 0,25$ %

Tabla I: Parámetros medidos

Las señales generadas por los sensores, así como los proporcionados por los dispositivos de medición, se obtuvieron mediante un PC de adquisición de datos sistema SCXI 1000 de *National Instruments*. Todos los datos se obtienen con un periodo de muestreo de 0,5 segundos.

3. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

El enfoque que se ha utilizado para desarrollar la aplicación se muestra de manera general en la Fig. 3, donde se observa que la aplicación propuesta se realiza en tres pasos: adquisición de datos en tiempo real, procesamiento en el filtrado de datos y por último, la presentación de los resultados. En el primer paso, la información es cargada por el usuario que sube la información pertinente acerca de la configuración del banco de ensayo. Esta instalación es flexible para poder trabajar con dos configuraciones, con o sin IHX (véase la Fig. 2). El proceso de expansión también tiene dos tipos de dispositivos, válvula electrónica y con válvula de expansión termostática. Además, el tipo de refrigerante (como HFO-1234yf y HFO-1234ze, R407C, entre otros) y la concentración propilenglicol de la mezcla, permiten al usuario definir la configuración del banco experimental y el archivo generado por el sistema DAQ con los datos de la herramienta de la prueba bajo estudio. Con la información registrada en el primer paso, la aplicación llama a las bibliotecas dinámicas del REFPROP para determinar propiedades termofísicas en cada estado termodinámico que se midió, esto se realiza mediante las funciones disponibles en Excel y los procedimientos desarrollados en VBA (*Visual Basic para*

Aplicaciones) para optimizar el tiempo de cálculo en el análisis energético. A continuación, la información se filtra. Finalmente, un análisis energético para el sistema de compresión de vapor se lleva a cabo y para cada uno de los componentes bajo las condiciones de estado estacionario.

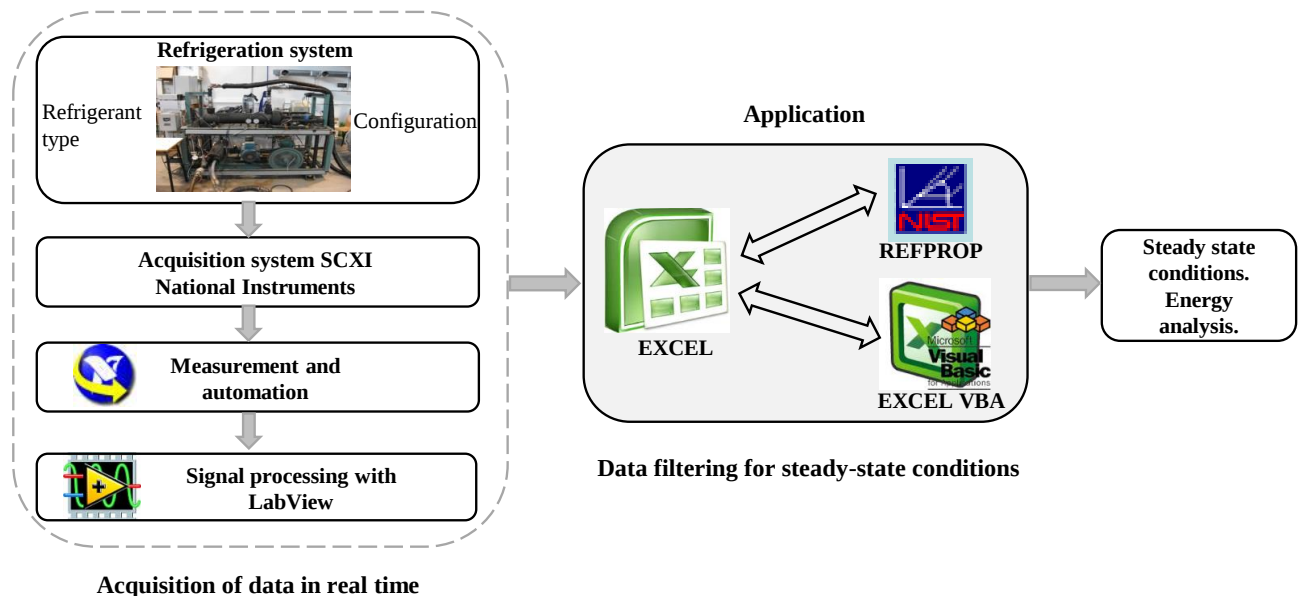


Fig. 3: Enfoque general para el desarrollo de la aplicación

Los principales problemas que se presentan cuando se trabaja con datos experimentales generados por sistemas de compresión de vapor se debe a varios factores; la configuración del sistema de compresión de vapor (con o sin IHX), tipo de refrigerante, concentración del propilenglicol y el tamaño del archivo de datos generados por el sistema DAQ. Las directrices para desarrollar la aplicación se enumeran a continuación:

Capacidad de selección de la configuración utilizada en el banco de pruebas para análisis. Esta opción debe incluir tipo de refrigerante, el porcentaje de la mezcla agua-glicol utilizada en el evaporador, una etapa simple o con intercambiador de calor intermedio (IHX) así como el tipo de dispositivo de expansión.

Cambio de tamaño según el tamaño de los archivos de datos. Esta es una característica importante ya que la información recogida varía en función del tiempo dedicado al evaluar las condiciones de funcionamiento del banco de pruebas. Es decir, que el número de filas contiguas en el cálculo varía de acuerdo con la información, por lo tanto, el análisis energético del sistema debe ser adaptable a los datos experimentales obtenidos.

Filtrado de datos. La aplicación debe tener una opción de filtrado de datos y una función que permite redimensionar y actualizar toda la información y los gráficos. Esta característica le permite separar entre datos transitorios y datos estacionarios de todos los datos obtenidos, estableciendo un rango de variación y mostrando sólo datos de interés (análisis energético en estado estacionario).

Resultados del rendimiento energético. La aplicación debe mostrar el rendimiento energético promedio, así como la desviación estándar de los datos experimentales para el sistema experimental completo. Además, los análisis energéticos de cada componente principal deben ser presentados.

Visualización gráfica de los resultados. Los resultados gráficos deben ajustarse automáticamente la cantidad de datos. Esta función incluye la visualización del comportamiento de las principales variables medidas tales como: temperaturas de salida, T , y presiones, P , en el condensador y evaporador, grado de sub-enfriamiento, grado de recalentamiento, SCD, caudal volumétrico de los fluidos secundarios, $\dot{V}_w, \dot{V}_g$, flujo másico de refrigerante, $\dot{m}_{ref}$, y desde el análisis térmico, la información que debe ser mostrada incluye la capacidad de refrigeración en el evaporador, $\dot{Q}_o$, el calor extraído en el condensador, $\dot{Q}_k$, así como el rendimiento volumétrico, η_v , isoentrópico, η_s , y combinado, η_{comb} , y el desempeño energético del sistema de refrigeración, COP .

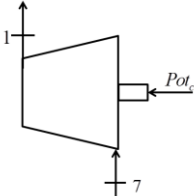
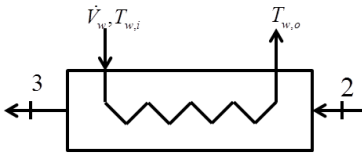
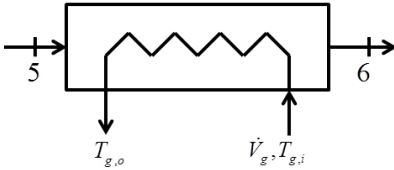
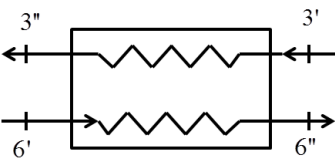
 Compressor	$\eta_v = \frac{60 \dot{m}_{ref}}{\rho_7 V_G N} \quad (1)$ $\eta_s = \frac{h_{1,s} - h_7}{h_1 - h_7} \quad (2)$ $\eta_{comb} = \frac{\dot{m}_{ref} (h_{1,s} - h_7)}{Pot_c} \quad (3)$
 Condenser	$\dot{Q}_k = \dot{m}_{ref} (h_2 - h_3) = \rho_w \left(\frac{\dot{V}_w}{3600} \right) c_{p,w} (T_{w,o} - T_{w,i}) \quad (4)$ $U_k = \frac{\dot{Q}_k}{A_k (\Delta T_{ml})_k} \quad (5)$ $(\Delta T_{ml})_k = \frac{(T_2 - T_{w,o}) - (T_3 - T_{w,i})}{\ln \left(\frac{T_3 - T_{w,i}}{T_2 - T_{w,o}} \right)} \quad (6)$ $SCD = T_{cond} - T_3 \quad (\text{single stage}) \quad (7)$
 Evaporator	$\dot{Q}_o = \dot{m}_{ref} (h_6 - h_5) = \rho_g \left(\frac{\dot{V}_g}{3600} \right) C_{p,g} (T_{g,i} - T_{g,o}) \quad (8)$ $U_o = \frac{\dot{Q}_o}{A_o (\Delta T_{ml})_o} \quad (9)$ $(\Delta T_{ml})_o = \frac{(T_{g,i} - T_6) - (T_{g,o} - T_{evap})}{\ln \left(\frac{T_{g,o} - T_{evap}}{T_{g,i} - T_6} \right)} \quad (10)$ $SHD = T_6 - T_{evap} \quad (11)$
 IHX	$\dot{Q}_{IHX} = \dot{m}_{ref} (h_{3'} - h_{3''}) = \dot{m}_{ref} (h_{6''} - h_{6'}) \quad (12)$ $U_{IHX} = \frac{\dot{Q}_{IHX}}{A_{IHX} (\Delta T_{ml})_{IHX}} \quad (13)$ $(\Delta T_{ml})_{IHX} = \frac{(T_{3'} - T_{6''}) - (T_{3''} - T_{6'})}{\ln \left(\frac{T_{3'} - T_{6'}}{T_{3''} - T_{6''}} \right)} \quad (14)$ $SCD = T_{cond} - T_{3''} \quad (\text{with IHX}) \quad (15)$
 Expansion device	$h_4 = h_5 \quad (16)$ $COP = \frac{\dot{Q}_o}{Pot_c} \quad (17)$

Tabla II: Fundamentos físicos de cada uno de los componentes del banco de ensayos

La aplicación desarrollada es capaz de adaptarse a diferentes acoplamientos basados en el sistema de obtención de los datos experimentales, siempre que la instalación se base en compresión de vapor. La contribución de la herramienta está dirigida al análisis energético del sistema en estado estacionario, el desempeño transitorio de la aplicación no es de interés en este trabajo.

3.1. FUNDAMENTOS FÍSICOS PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO

El objetivo de la evaluación energética de nuevos refrigerantes alternos en el banco experimental, es de valorar su comportamiento en los sistemas de compresión con los refrigerantes que deben ser sustituidos (R134a). Con este fin, cada uno de los componentes del sistema de refrigeración y el sistema global se estudian mediante aspectos termodinámicos, además de características geométricas y parámetros medidos, como el consumo de energía y flujo másico del refrigerante. Los fundamentos físicos de cada uno de los componentes de la instalación experimental se muestran en la tabla II, que incluye los fundamentos para el compresor, condensador, evaporador, IHX, la válvula de expansión y el rendimiento energético del sistema de refrigeración. Los principales parámetros para el compresor son los rendimientos: volumétrico, isoentrópico y combinado. Estos parámetros determinan el rendimiento del compresor bajo determinadas condiciones de operación. Los parámetros que definen el comportamiento energético de los intercambiadores de calor son la transferencia de calor y el coeficiente global de transferencia de calor. El análisis térmico de los intercambiadores de calor se basa en la diferencia de temperatura media logarítmica. Este método es una escala logarítmica promedio de la diferencia de temperatura entre las corrientes frías y calientes en cada extremo del intercambiador. Entre más grande es el ΔT_{mt} más calor se transfiere. Por último, el dispositivo de expansión se modela bajo un proceso isoentrálpico.

4. RESULTADOS

En base a los fundamentos físicos para el análisis energético de los componentes y el desempeño de la instalación, la aplicación fue desarrollada utilizando características de las hojas de cálculo. En esta sección, las ventanas y las hojas de cálculo que se utilizaron en la aplicación son descritas.

Cuando se inicia la aplicación, aparece la pantalla principal que se muestra en la Fig. 4. Esta pantalla es una hoja de cálculo con la barra de navegación de la parte superior de la pantalla. Esto permite acceder a las diferentes hojas de cálculo que contiene la aplicación. Además, esta pantalla contiene un botón con la etiqueta "Análisis de Datos Experimentales". Cuando se pulsa este botón, el proceso de análisis de datos experimentales comienza, el cual recopila información sobre la fecha del análisis, el porcentaje de concentración del agua-glicol como fluido secundario utilizado en el evaporador, tipo de refrigerante, fluidos puros o mezclas, la válvula de expansión (electrónica o termostática) que se utiliza, y la configuración de compresión de vapor, con o sin IHX. Cuando la válvula de expansión termostática está seleccionada, el usuario tiene que seleccionar el tipo de orificio disponible en el banco de pruebas. Por lo tanto, cuando un archivo de datos es encontrado, el usuario visualiza todos los datos procesados e inicia el filtrado y revisión de la información generada por el cálculo del análisis energético.

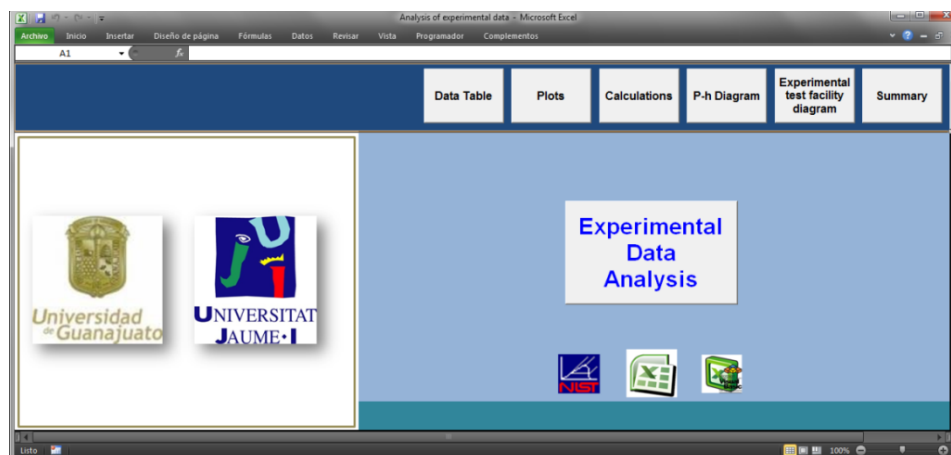


Fig. 4: Pantalla principal cuando se inicia la aplicación

Desde la pantalla principal y mediante los botones de navegación, el usuario puede acceder a una hoja denominada "Tabla de datos" (Fig. 5). En esta hoja los datos experimentales están almacenados y el cálculo de propiedades termodinámicas se llevan a cabo para cada estado termodinámico (véase la Fig. 2). Haciendo clic en el botón "gráficas" situado en la barra de navegación, el usuario puede ver la evolución de las principales variables que se midieron y los parámetros que intervienen en el análisis energético del sistema. De esta hoja de cálculo (Fig. 6), el usuario puede identificar la temporalidad en los parámetros medidos tales como presión, temperatura y flujo másico. Otros parámetros que el usuario puede visualizar es el comportamiento energético del banco experimental y de sus componentes principales. Todas las gráficas contenidas en esta hoja muestra el promedio de los valores junto con la desviación estándar de los datos. El rango de desviación de los datos es considerado como una desviación estándar, y se muestra como una línea punteada en la Fig. 6. Desde la tabla de datos en la hoja de cálculo, el usuario puede utilizar las herramientas de la tabla dinámica para filtrar la información. Los datos filtrados se definen por intervalos de interés de las variables medidas considerando un valor de referencia o un intervalo (véase la Fig. 7).

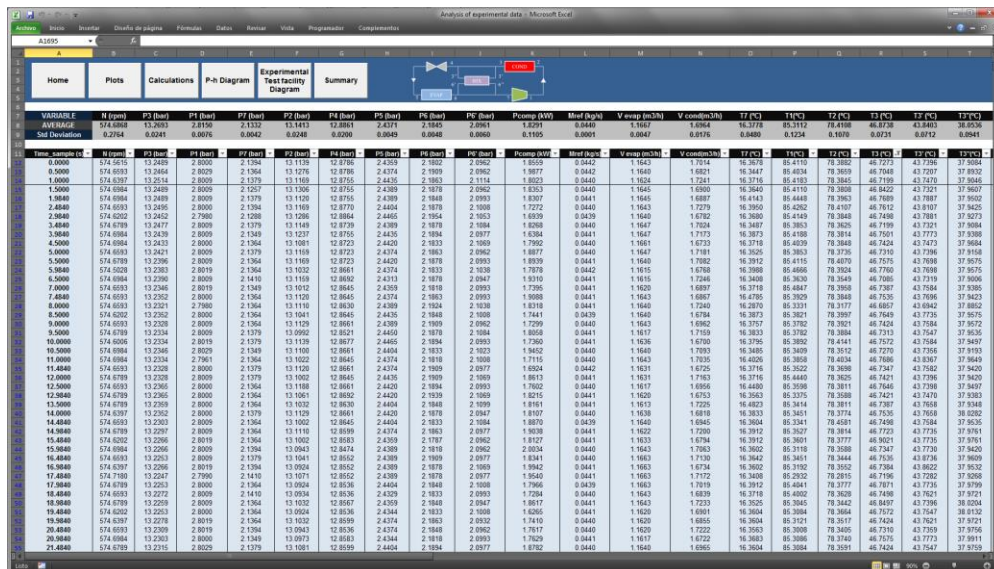


Fig. 5: Cargada de datos y cálculos

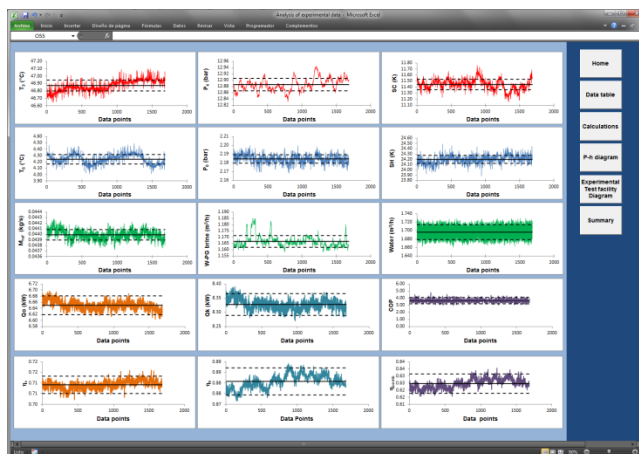


Fig. 6: Visualización gráfica de las principales variables y parámetros energéticos

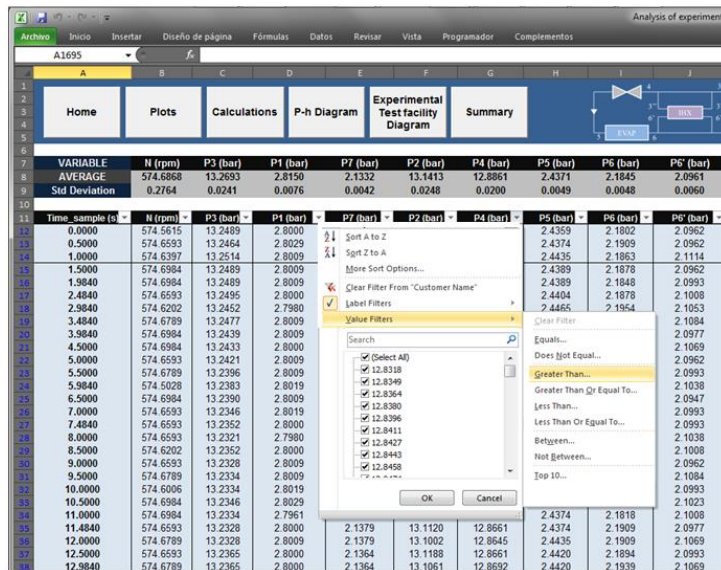


Fig. 7: Filtrado de datos como una característica de la tabla dinámica.

Una vez que el usuario ha concluido el filtrado de los datos, la siguiente hoja de cálculo que aparece bajo el botón etiquetado como "Cálculos", se muestra en la Fig. 8.

Esta hoja de cálculo muestra los parámetros más importantes para todo y cada uno de los componentes del sistema de compresión de vapor. Esta tabla presenta las eficiencias del compresor, coeficiente global de transferencia de calor para cada intercambiador de calor; y de los principales parámetros que determinan las condiciones de trabajo del banco de pruebas. Esta hoja ofrece información sobre el análisis energético promedio de los datos experimentales para cada componente de la instalación experimental en las condiciones de estado estacionario. La hoja de cálculo de la Fig. 9, donde propiedades termodinámicas para cada uno de los componentes del sistema se muestran con su representación gráfica en un diagrama $p-h$ correspondiente al refrigerante. El diagrama $p-h$ es muy útil para identificar rápidamente la influencia de IHX en los parámetros de recalentamiento y el grado de enfriamiento (SHD, SCD). El sistema de compresión de vapor que se muestra en la Fig. 10 ayuda a identificar cada estado termodinámico representado en el diagrama $p-h$ del banco experimental como se muestra en la Fig. 9. Además, el usuario puede ver los valores promedio del flujo másico de refrigerante, caudales volumétricos del secundario, y la velocidad del compresor.

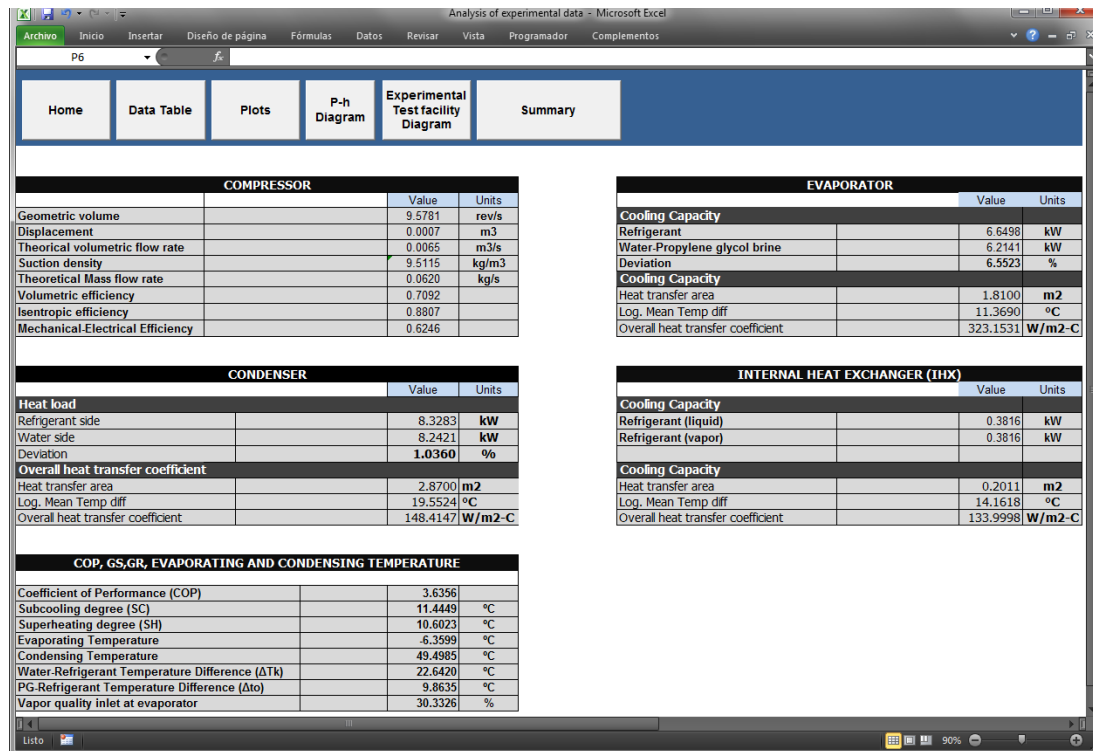


Fig. 8: Estimación energética con los datos promedio para todo el sistema de compresión de vapor y sus componentes

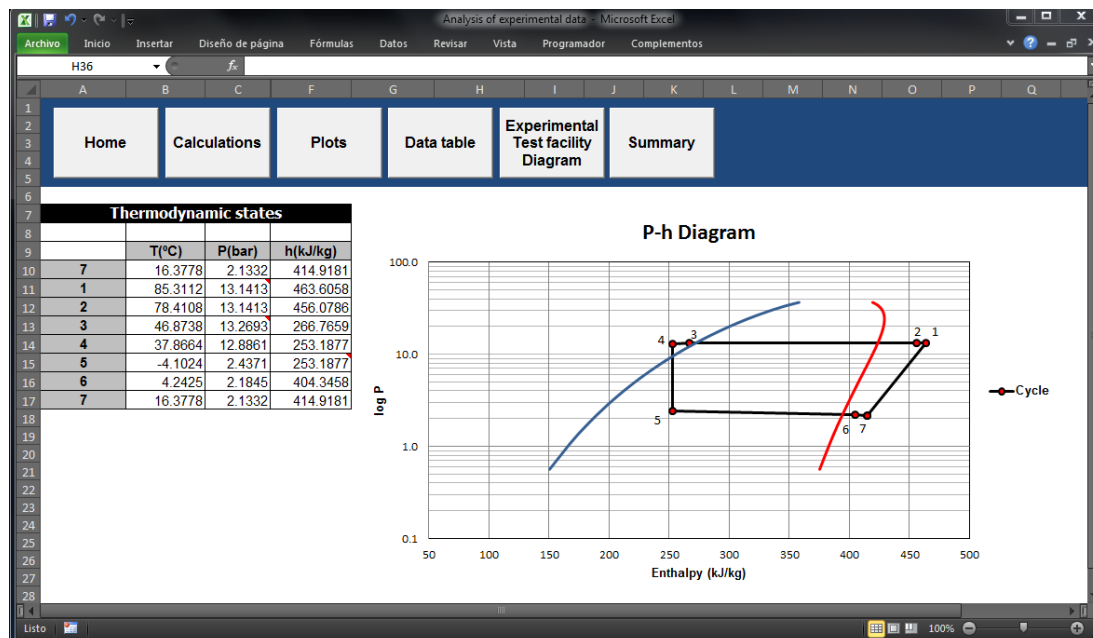


Fig. 9: Principales estados termodinámicos para el sistema experimental de compresión de vapor y su representación en un diagrama p-h

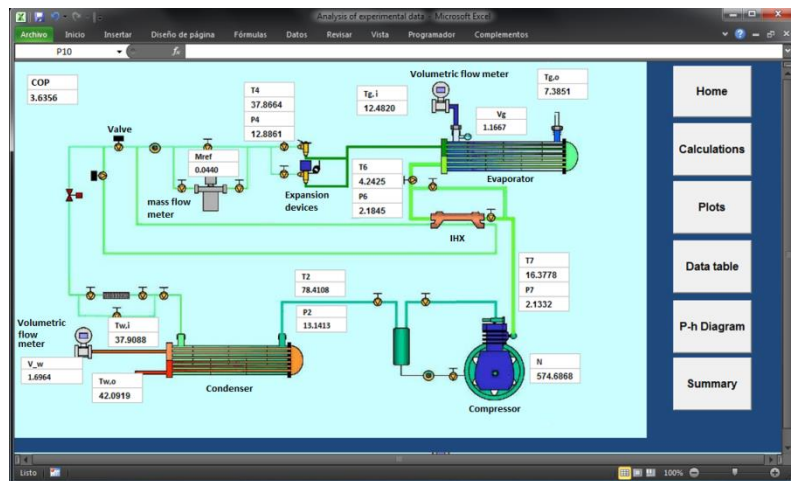


Fig. 10: Esquema del sistema de compresión de vapor con los valores promedio de las variables medidas

Por lo tanto, la aplicación presentada en este documento es una herramienta muy interesante en la evaluación energética de los distintos sistemas de generación de frío, ya sea para refrigeración o aire acondicionado que estén instrumentados, y también desde el punto de vista educativo, de investigación o en el plano industrial. En este último caso, la mayoría de las instalaciones carecen de sofisticados sistemas de monitoreo y evaluaciones del desempeño energético del sistema de refrigeración, o en algunos otros, es imposible analizar grandes resultados del sistema, y por esta razón, este tipo de aplicación se convierte en una herramienta interesante desde el punto de vista práctico, económico y funcional. Entre sus ventajas, se incluye la flexibilidad para adaptarse a otras instalaciones (basado en ciclo de compresión de vapor), teniendo en cuenta que todo lo que se necesita para iniciar el análisis, es el registro de los datos que se han de adquirir en tiempo real durante la operación de la instalación. Por lo tanto, la herramienta a nivel industrial puede ser un complemento en problemas de mantenimiento en sus elementos principales, tales como en intercambiadores de calor o el propio compresor, ya que hay parámetros específicos de las hojas que ofrecen el rendimiento de los equipos.

4.1 EXPERIENCIA EDUCATIVA

Como se mencionó anteriormente, la aplicación de la hoja para el filtrado de datos y análisis energético del sistema de refrigeración puede ser una aplicación fácil de usar para los estudiantes de ingeniería. En este contexto, los programas educativos de ingeniería tratan de utilizar software en diferentes áreas para ayudar a reforzar la educación del estudiante. Actualmente la informática permite crear herramientas que consienten optimizar el grado de interactividad y el nivel de retención de la información en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Temas como la termodinámica y transferencia de calor son un área de enorme importancia en el desarrollo académico de los estudiantes de ingeniería mecánica con especialización en termofluidos.

Para evaluar el uso de la herramienta computacional como un laboratorio virtual, se propusieron 17 alumnos de nivel intermedio (tercer año) dentro de la asignatura Refrigeración y Aire Acondicionado, la cual se ofrece en un período de 12 semanas, con 3 horas de clase por semana. El propósito del uso de la herramienta consistió principalmente en: i) definir la configuración simple de la instalación experimental, ii) asignar un refrigerante convencional como el fluido de trabajo (R134a), iii) buscar y cargar el archivo bajo ciertas condiciones de operación, iv) una vez que el estado estacionario de la sistema fue evaluado, el alumno debe reproducir la información obtenida respecto a la eficiencia energética de las instalaciones, COP. Por último, el estudiante debe repetir los pasos anteriores, pero ahora, si se asigna un refrigerante alterno como el HFO-1234yf, esto con el fin de comparar el rendimiento energético entre ambos refrigerantes corroborando lo que se ha encontrado en la literatura en cuanto a la tendencia de los refrigerantes alternos.

Así, el 76% de los estudiantes que utilizaron la herramienta lograron los mismos resultados utilizando hojas de cálculo y expresando las ecuaciones termodinámicas para cada elemento de la instalación. El grupo de estudiantes concluyó que la herramienta es de fácil uso, pero en virtud de un conocimiento previo de los conceptos de los sistemas de compresión de vapor, además, la herramienta muestra parámetros de los equipos de intercambio de calor y una información completa sobre el rendimiento del compresor, aspectos que fortalecen la formación del estudiante.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una aplicación de hojas de cálculo para el filtrado de datos y análisis energético de un sistema experimental de compresión de vapor. Esta aplicación simplifica el trabajo hecho en la post-adquisición de un sistema de refrigeración experimental. Las principales conclusiones de este trabajo se pueden resumir de la siguiente manera: Se demostró que el uso de Excel se puede aplicar al análisis experimental de datos en el campo de la refrigeración en la investigación de nuevos fluidos refrigerantes. La aplicación es muy robusta, porque se puede utilizar una amplia gama de fluidos. Además, puede ser utilizada tanto en la investigación y con fines educativos. La aplicación resultante es simple y fácil de usar para diversos tipos de personas (es decir los estudiantes de ingeniería, investigadores, etc.) sin el conocimiento previo de programación de VBA o de las interacciones con las librerías dinámicas del REFPROP. Esta aplicación se puede utilizar en cualquier computadora, reduciendo los costos y tiempo en comparación con los programas informáticos de análisis de datos que deben ser comprados. El usuario sólo tiene que centrarse en el análisis energético de cada uno de los componentes de los sistemas de compresión de vapor y el rendimiento global del sistema. Las excelentes características que Excel proporciona son utilizadas en la aplicación, lo que permite trabajar con datos archivos de texto de tamaño variable, así como una amplia gama de refrigerantes (puros y mixtos).

Esta aplicación resulta en una herramienta útil en el área de la refrigeración porque responde a la necesidad del análisis de datos rápida y la evaluación del desempeño del sistema. Esta herramienta se puede utilizar en la enseñanza de la ingeniería con el fin de fortalecer el conocimiento sobre el estudio de los sistemas de refrigeración por compresión de vapor, un proyecto en el que la Universidad de Guanajuato y la Universidad Jaume I han participado.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Guanajuato a través del Programa Integral de Fortalecimiento Institucional (PIFI 2013) y a la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bovey R, Wallentin, D, Bullen , y Verde J. *Desarrollo Profesional Excel*. Segunda edición. Addison-Wesley, Estados Unidos (2009). ISBN-13:978
- [2] Chehab , El-Hajj A, Al-Husseini M, et al. "Las aplicaciones de hojas de cálculo en Ingeniería Eléctrica: una revisión". *Int. J. Engng Ed*. Vol 20 (2004) p. 902-908.
- [3] Lowry G, y Thomas S. " Herramienta de cálculo de luz natural directa iluminación adaptable para diferentes cristales modelos propiedades y el cielo basado en hojas de cálculo". *Build Environ* Vol 45 (2010), pág. 1081-1086. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.09.017>
- [4] Ayala M, Cabrerizo M, Tito M, et al. "Una aplicación de hojas de cálculo para el tratamiento de largo plazo grabaciones de EEG". *Comput Biol Med*. Vol 39 (2009) p. 844-851. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combiomed.2009.07.003>
- [5] Cheetancheri KG, y Cheng EH. "Análisis de mecanismos con excel y Ch basadas en hojas de cálculo interactivas". *Adv Eng softw*. Volumen 40 (2009) pág. 274-280. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2007.08.003>
- [6] Aliane N. "Adquisición de datos y control en tiempo real utilizando hojas de cálculo: Excel interfaz con hardware externo". *ISA T*. Vol 49 (2010) pág. 264-269. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2010.03.009>
- [7] Iglesias OA, Pastor J, Henseler A, et al. "Hojas de diseño conceptual de procesos químicos". *Int. J. Engng. Ed*. Vol 20 (2004) 999-1004.
- [8] señor Morishita E, Iwata Y Yuki K, et al. "Cálculo de dinámica de fluidos curso problemas aeronáuticos". *Int. J. Engng. Ed*. 17 (2000) p. 294-311.
- [9] Jordania . "Una hoja de radiación térmica método de cálculos". *Int. J. Engng. Ed*. Vol 20 (2004) p. 991-998.
- [10] Lemmon EW y McLinden ML. *Referencia líquido y las propiedades de transporte termodinámico*. REFPROP versión 8.0 . Base de datos de referencia estándar NIST 23, Gaithersburg, Maryland. (2002).