

En español

Evaluación termodinámica de sistemas de climatización centralizados por agua helada usando herramientas de inteligencia artificial

Juan Carlos Armas¹, Margarita Lapido Rodríguez²,
Julio Rafael Gómez³, Yarelis Valdivia Nodal⁴

RESUMEN

Se presenta el análisis de un sistema centralizado de climatización por agua helada con el objetivo de evaluar las irreversibilidades en los componentes principales del ciclo, así como la sensibilidad de este indicador ante las variaciones de las condiciones de operación.

Se hace uso de redes neuronales artificiales (RNA) y algoritmos genéticos (AG), herramientas de *Matlab* para determinar las propiedades de los refrigerantes en cada punto del ciclo en estudio y que éstas, a su vez, interactúen con las ecuaciones que describen el comportamiento termodinámico del sistema. La temperatura del refrigerante a la salida del compresor se determina a partir de un modelo híbrido que conjuga el modelo neuronal con un algoritmo genético simple como herramienta de optimización. Como resultado final se identifican los componentes del ciclo más sensibles ante las variaciones de las condiciones de trabajo, se obtiene que el evaporador y el mecanismo de expansión, respectivamente, siguen al compresor con pérdidas exergéticas significativas, sumando entre todas 85,62% de las irreversibilidades totales del sistema, conformándose así una herramienta útil para la evaluación de tales sistemas.

Palabras clave: análisis de irreversibilidades, exergía, redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos

Recibido: febrero 12 de 2010

Aceptado: mayo 27 de 2011

Introducción

El análisis termodinámico de las instalaciones energéticas persigue dos objetivos: la determinación de la eficiencia termodinámica de los procesos y la búsqueda del mejor camino para el óptimo aprovechamiento de la energía. A tal fin se han utilizado históricamente dos enfoques en el análisis de los sistemas: el llamado enfoque energético, sustentado exclusivamente en la primera ley de la termodinámica; y el enfoque denominado exergético, el cual apoya al anterior considerando la segunda ley

In English

A thermodynamic evaluation of chilled water central air conditioning systems using artificial intelligence tools

Juan Carlos Armas⁵, Margarita Lapido Rodríguez⁶,
Julio Rafael Gómez⁷, Yarelis Valdivia Nodal⁸

ABSTRACT

An analysis of a chilled water central air conditioning system is presented. The object was to calculate main cycle component irreversibility, as well as evaluating this indicator's sensitivity to operational variations.

Artificial neural networks (ANN), genetic algorithms (GA) and *Matlab* tools were used to calculate refrigerant thermodynamic properties during each cycle stage. These tools interacted with equations describing the system's thermodynamic behaviour. Refrigerant temperature, when released from the compressor, was determined by a hybrid model combining the neural model with a simple genetic algorithm used as optimisation tool; the cycle's components which were most sensitive to changes in working conditions were identified. It was concluded that the compressor, evaporator and expansion mechanism (in that order) represented significant exergy losses reaching 85.62% of total system irreversibility. A very useful tool was thus developed for evaluating these systems.

Keywords: irreversibility analysis, exergy, artificial neuronal network, genetic algorithm.

Received: February 12th 2010

Accepted: May 27th 2011

Introduction

Thermodynamic analysis of energy facilities has two objectives: determining a process' thermodynamic efficiency and finding the best strategy for such energy's optimal use. Two approaches to systems analysis have thus been used to date: the so-called energetic approach based exclusively on the first law of thermodynamics and the exergetic approach supporting the energetic approach by including the second law of thermodynamics as a crucial part of current energy use. Analysis of the application of

¹ Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Cienfuegos, Cuba. jcarlos@ucf.edu.cu

² Ingeniera Termoenergética, Doctora en Ciencias Técnicas, Universidad de Cienfuegos, Cuba. mlapido@ucf.edu.cu

³ Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Cienfuegos, Cuba. jgomez@ucf.edu.cu

⁴ Ingeniera Mecánica, Master en Ciencias, Universidad de Cienfuegos, Cuba. yvaldivia@ucf.edu.cu

⁵ Mechanical Engineer, Doctor of Technical Sciences, Universidad de Cienfuegos, Cuba. jcarlos@ucf.edu.cu

⁶ Thermal Energy Engineer, Doctor of Technical Sciences, Universidad de Cienfuegos, Cuba. mlapido@ucf.edu.cu

⁷ Electrical Engineer, Doctor of Technical Sciences, Universidad de Cienfuegos, Cuba. jgomez@ucf.edu.cu

⁸ Mechanical Engineer, Master of Science, Universidad de Cienfuegos, Cuba. yvaldivia@ucf.edu.cu

En español

de la termodinámica como parte crucial en el aprovechamiento real de la energía. No es posible desligar el análisis de primera ley de la aplicación del análisis de segunda ley, especialmente en sistemas donde aparece trabajo asociado o aprovechamiento de fuentes de energía a diferentes temperaturas. La aplicación de ambos criterios conforma una herramienta poderosa para evaluaciones cuantitativas y cualitativas a sistemas y procesos energéticos, posibilitando detectar potenciales de aprovechamiento de energía útil y evaluar las vías que permitan optimizar su uso.

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor de un sistema de climatización centralizado por agua helada a partir de un enfoque termodinámico. Se determinan las irreversibilidades en los componentes principales del ciclo, así como su influencia en la irreversibilidad total del ciclo, y se evalúa la sensibilidad e impacto de éstas ante las variaciones de las condiciones de operación. Se incorpora como herramienta novedosa de cálculo la utilización de redes neuronales artificiales para el modelado y determinación de propiedades termodinámicas del refrigerante, y un algoritmo genético que describe el comportamiento del sistema. Estas técnicas de inteligencia artificial agilizan el cálculo, simplifican los modelos y han demostrado ser tan precisas como los más complejos y rigurosos modelos termodinámicos. En el caso particular del presente trabajo, se constató que el empleo de estas herramientas de inteligencia artificial compensa con creces las dificultades del modelado termodinámico de algunos elementos del sistema analizado, sin pérdida o demérito de la rigurosidad termodinámica, pues sólo se utilizan en aquellos aspectos como la reproducción de propiedades de la sustancia de trabajo.

El método exergético y su aplicación a sistemas de refrigeración y aire acondicionado

La metodología del análisis exergético está bien establecida, fundamentalmente para el caso de las instalaciones térmicas de fuerza (Boer, 2005; Kelly, 2009; Lapido, 2006; Tsatsaronis, 2002; Valero, 2005). Sin embargo, su aplicación a los sistemas de refrigeración no ha sido tan extensiva por la difícil comprensión de las implicaciones del concepto de exergía en estos ciclos, cuyo objetivo final no es la producción de trabajo útil, sino la absorción de calor del recinto que se desea climatizar.

Autores como Kotas (1985), Szargut (2004), Yumrutas (2002) d'Accadia (2004), Morosuk (2009) y Syed M. Zubair (2000) han abordado esta problemática desde diferentes puntos de vista y con fines disímiles. Szargut plantea que las pérdidas exergéticas fundamentales en los sistemas de climatización se deben a: ineficiencias en la compresión, calor rechazado al sumidero, caída de presión en conductos y pérdidas de calor en la válvula de expansión.

No obstante, se reportan escasas referencias respecto a la destrucción de exergía en los componentes individuales del ciclo ante las variaciones de las condiciones de operación, cuestión de importancia relevante en los sistemas de climatización continuamente sometidos a las variaciones climatológicas y de ocupación de la edificación climatizada.

Una dificultad adicional para la aplicación del método exergético a los ciclos de refrigeración radica en la definición de la tem-

In English

the first law cannot be separated from analysis of the second law, especially in systems involving associated work with or exploitation of energy sources at different temperatures. Applying both criteria constitutes a powerful tool for quantitative and qualitative evaluation of energy systems and processes thus enabling potential useful energy to be detected and assessing ways of optimising their use.

This study was aimed at evaluating refrigeration cycle behaviour by vapour compression in a chilled water central air conditioning system by adopting a thermodynamic approach. Irreversibility was determined for the cycle's main components as well as their influence on the cycle's total irreversibility. Their variability and impact on operational conditions was assessed. The use of artificial neural networks (for modelling and determining the refrigerant's thermodynamic properties) and a genetic algorithm (describing the system's behaviour) were incorporated as innovative tools for making the calculations. These artificial intelligence techniques facilitate calculation and simplify models. They have proved to be as accurate as more complex and rigorous thermodynamic models. In the particular case of this study, it was found that using these artificial intelligence tools outweighed the difficulties of thermodynamic modelling of some elements of the system being analysed with no loss or demerit regarding rigorous thermodynamics, for they are only used in relation to aspects like working substance reproduction properties.

The exergy method and its application to refrigeration and air conditioning systems

Exergy analysis methodology is well established, mainly in the case of thermal power plants (Boer, 2005; Kelly, 2009; Lapido, 2006; Tsatsaronis, 2002; Valero, 2005). However, its application to refrigeration systems has not been equally extensive due to difficulties in understanding the implications of the concept of exergy in these cycles, given that it is not ultimately aimed at producing useful work but to heat absorption in a particular room being conditioned.

Authors like Kotas (1985), Szargut (2004), Yumrutas (2002) d'Accadia (2004), Morosuk (2009) y Syed M. Zubair (2000) have approached this problem from different perspectives and with different purposes in mind. Szargut has stated that main exergy losses in air conditioning systems are caused by compression inefficiency, heat rejected to the drain, pressure drop in ducts and heat loss in the expansion valve.

However, few reports have dealt with exergy destruction in the cycle's individual components caused by changes in operating conditions, an issue having significant importance in conditioning systems continuously subject to changing weather and occupation of the conditioned building.

Another difficulty in applying the exergetic method to refrigeration cycles lies in the definition of the reference temperature.

En español

In English

peratura de referencia. Algunos autores toman distintos estados de referencia para el refrigerante primario y el secundario, por ejemplo, temperatura ambiente para el primario y temperatura de entrada del agua al evaporador para el secundario.

La dualidad de estados de referencia para los cálculos exergéticos se debe a que los sistemas de climatización trabajan indistintamente con temperaturas inferiores y superiores a la del medio ambiente. Debido a estas particularidades del sistema, en algunos puntos aparecen corrientes exergéticas negativas, lo que aparentemente contradice los principios termodinámicos. Szargut resuelve esta problemática adicionando a cada una de las corrientes exergéticas del sistema la mayor exergía negativa obtenida, cambiando la escala por descenso del sistema de referencia y convirtiendo todas las corrientes exergéticas negativas en términos positivos, procedimiento que se utiliza en el presente trabajo.

Arquitectura de la red neuronal artificial empleada para la obtención de las propiedades del refrigerante R22

Para la obtención de las propiedades termodinámicas del refrigerante R22 se diseñó un modelo neuronal correspondiente a una red multicapa con propagación hacia adelante y algoritmo de aprendizaje con retro propagación (Z.H.Z, 2005; Armas, 2006); se diseñaron y obtuvieron tres redes neuronales artificiales para las zonas de saturación, sobrecalentamiento y su enfriamiento, respectivamente. Las redes neuronales fueron entrenadas a partir de las propiedades termodinámicas del R22 tomadas de la literatura (ASHRAE, 2009), respecto del diseño de cada red neuronal el número de neuronas de la capa oculta fue obtenido a partir de un procedimiento de prueba y error partiendo de un pequeño número de neuronas, y con el propósito de evitar el sobreentrenamiento se utilizó la opción de validación y prueba con conjuntos de datos diferentes de los de entrenamiento.

La RNA referente a la saturación se diseñó con algunas particularidades que la diferencia de las restantes (figura 1), se estructuró con 1 neurona en la primera capa para la variable de entrada presión (P), 72 neuronas en la capa intermedia y 8 neuronas en la tercera capa, correspondientes a las variables de salida temperatura de saturación (T_{sat}), entalpía del líquido (h_f), entalpía del vapor (h_g), entropía del líquido (s_f), entropía del vapor (s_g), volumen específico del líquido (v_f), volumen específico del gas (v_g) y coeficiente adiabático (k). Se utilizaron como funciones transferenciales la *tansig* en la primera y segunda capa, y la *purelin* a la salida de la red.

Some authors consider different reference states for primary and secondary refrigerant, for example, environmental temperature for the primary and water inlet temperature in the evaporator for the secondary refrigerant.

The duality of reference states for exergy calculations is caused by air conditioning systems capability to work interchangeably with temperatures lower and higher than the environment. Negative exergy thus flows at some points because of such system peculiarities, apparently contradicting the principles of thermodynamics. Szargut has solved this problem by adding the highest negative exergy obtained to each exergy flow in the system, thus changing the scale by lowering the reference system and turning all exergy flows into negative exergy flows in positive terms, a procedure used in this study.

Architecture of the artificial neural network used to obtain the properties of refrigerant R22

A neural network model for a multilayer network spreading forward with back propagation learning algorithm (Z.H.Z, 2005; Armas, 2006) was designed for obtaining R22's pertinent thermodynamic properties. Artificial neural networks (ANN) for saturation areas, overheating and undercooling were designed and obtained. ANN were trained from the thermodynamic properties of R22, according to the literature (ASHRAE, 2009). The number of neurons in the hidden layer was obtained by trial and error for designing each neural network, starting from a small number of neurons. Options like validation and set tests with different training data were used to avoid overtraining.

A saturation ANN was designed, having some special features distinguishing it from the others (Figure 1). It was structured with one neuron in the first layer for pressure (P), input variable, 72 neurons in the intermediate layer and 8 neurons in the third layer for output variables [saturation temperature (TSAT), liquid enthalpy (h_f), vapour enthalpy (h_g), fluid entropy (sf), vapour entropy (sg), liquid specific volume (v_f), gas specific volume (v_g) and adiabatic coefficient (k)]. *Tansig* and *purelin* were used as transference functions in the first and second network output layers.

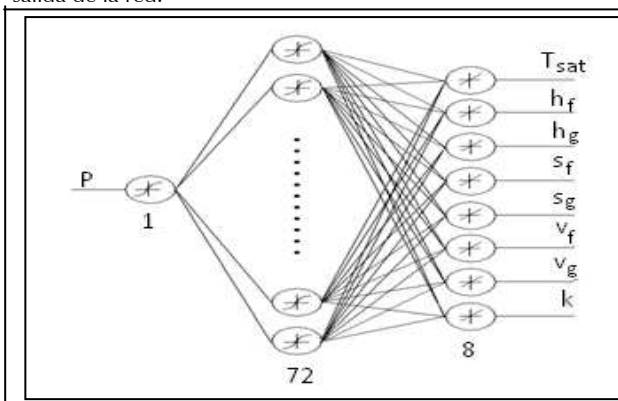


Figura 1. Arquitectura RNA 1-72-8. Zona de saturación.

Figure 1: 1-72-8 ANN architecture: saturation zone

En español

In English

La RNA para la zona de subenfriamiento se muestra en la figura 2. Consta de 3 capas con 2 neuronas en la primera capa para las variables de entrada P y grados de subenfriamiento GSE, 100 neuronas en la segunda capa y 3 neuronas en la última capa para las variables de salida entalpía (h), entropía (s) y volumen específico (v). Las funciones transferenciales utilizadas para el subenfriamiento y sobrecalentamiento son similares a la de la zona de saturación.

Para la zona de sobrecalentamiento se diseñó una red de 4 capas con 2 neuronas en la primera capa para las variables de entrada (P, T_{sob}), 9 y 6 neuronas en las capas intermedias y 3 neuronas en la capa de salida.

Figure 2 shows undercooling zone ANN. It consisted of three layers having two neurons in the first layer for input P and GSE (undercooling degrees). There were 100 neurons in the second layer and three for output in the last one [enthalpy (h), entropy (s) and specific volume (v)]. Transfer functions used for undercooling and overheating were similar to those for the saturation zone.

A four-layer network having 2 neurons in the first layer [input variables (P, T_{sob})], 9 and 6 neurons in the intermediate layers and 3 neurons in the output layer was designed for the overheating zone.

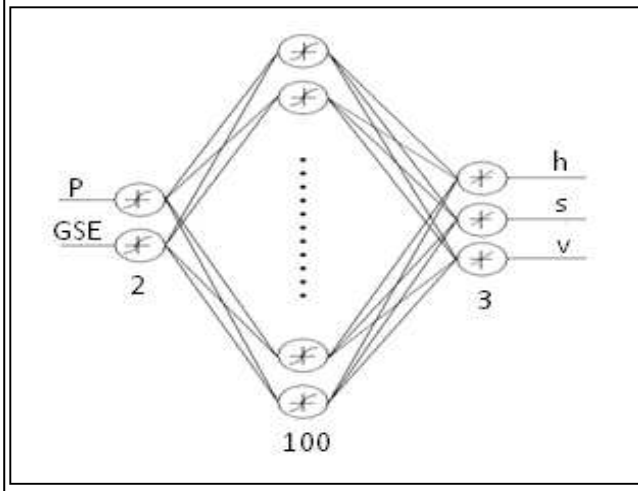


Figura 2: Arquitectura RNA 2-100-3. Zona de subenfriamiento.

Figure 2: 2-100-3 ANN architecture: subcooling zone

Modelo híbrido para la determinación de la temperatura de salida del compresor del sistema de refrigeración por compresión de vapor

La temperatura del refrigerante a la salida del compresor se determina a partir de un modelo híbrido que conjuga el modelo neuronal con un algoritmo genético simple como herramienta de optimización. La función de aptitud de este algoritmo es una función de error entre la entropía del gas a la salida del evaporador teniendo en cuenta los grados de sobrecalentamiento y la entropía que se obtiene del modelo neuronal del refrigerante en la zona de sobrecalentamiento. Para este modelo neuronal se logra un error cero, el cual garantiza que los resultados se obtengan para un proceso isentrópico.

Hybrid model for determining compressor cooling system temperature for vapour compression

The refrigerant's temperature when leaving the compressor was determined from a hybrid model combining the neural model with a simple genetic algorithm used as optimisation tool. The fitness function of this algorithm was an error function between gas entropy at evaporator outlet point (considering overheating degrees) and the entropy obtained from the refrigerant overheating area neural model. Zero error was achieved for this neural model, ensuring that the results were obtained for an isentropic process.

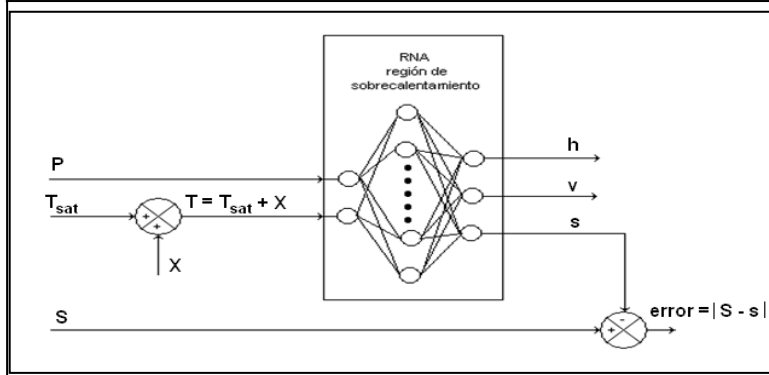


Figura 3. Híbrido para la determinación de los grados de sobrecalentamiento del refrigerante.

Figure 3: Hybrid for determining the degree of coolant overheating

En la figura 3 se muestra el diagrama que representa el proceso seguido en el algoritmo genético. La variable genética son los grados de sobrecalentamiento (X) y busca el valor de esta variable que garantiza un mínimo error.

Descripción de la instalación base

Se considera un ciclo de refrigeración convencional por compresión de vapor de un sistema de climatización centralizado por agua helada (figura 4). El sistema cuenta con dos circuitos de trabajo: el primario utiliza un refrigerante, normalmente R-22, considerado en el presente trabajo; pero también pudiera ser R-123, R-134a o R-407, según capacidad y tecnología utilizada en la compresión; estos últimos son más amigables con el ambiente comparado con el primero; y el secundario distribuye agua fría en los locales a climatizar.

Se analizan dos regímenes de trabajo, a saber:

- 1) Condiciones de operación: 482,48 kPa (-1°C) y 1.752,44 kPa (45 °C), como la presión y temperatura de evaporación y condensación, respectivamente, del circuito primario con R-22; y, para el secundario 8,5 °C y 10 °C de temperatura del agua helada en la impulsión y retorno.
- 2) Régimen a carga parcial caracterizado por: 460,91 kPa (-2 °C) y 1.799,52 kPa (48,2 °C) como presión y temperatura de evaporación y condensación, manteniéndose invariables las condiciones de temperatura del agua.

A partir de los regímenes de trabajo descritos para las condiciones nominales y parciales de la instalación, se hace uso de la función en *Matlab* que se describe en el epígrafe 1.6.

Desarrollo de función en *Matlab* para la evaluación del sistema

Para minimizar el tiempo de cómputo se creó una función en *Matlab* que integra las redes de cada zona de trabajo del sistema y se definen como variables de entrada las presiones de succión y descarga y los grados de sobrecalentamiento y subenfriamiento, en caso de estar presentes en el ciclo.

La función devuelve como resultado las propiedades del refrigerante en cada punto del circuito primario de refrigeración. El algoritmo para el cálculo de las propiedades del refrigerante en los puntos del circuito primario de refrigeración se muestra en la figura 4.

Integrando esta función a un subprograma que tiene implícitas las ecuaciones del comportamiento termodinámico del sistema, se crea un paquete de análisis para los sistemas de climatización sin tener que recurrir a software especializado difícil de adaptar a las especificaciones requeridas por el evaluador, lo que no ocurre con esta función.

Análisis termodinámico del sistema de climatización centralizado todo agua

Algunas consideraciones fueron tomadas para la realización del análisis termodinámico del sistema, relacionadas con la temperatura del estado de referencia tanto del refrigerante primario (R-22) 25 °C como del secundario (agua helada) 10 °C. El proceso de compresión del gas se considera adiabático, y las corrientes exergéticas del sistema son afectadas adicionándoles el mayor

Figure 3 gives a representation of the process followed in the genetic algorithm. Genetic variables were overheating degrees (X) and the search for this variable's values guaranteed error minimisation.

Description of the installation base

A conventional refrigeration cycle through vapour compression in a chilled water central air conditioning system is presented in Figure 4; such system has two working circuits. The primary circuit uses a refrigerant, typically R-22 as considered in this work, but it could also have been R-123, R-134a or R-407 according to capacity and technology used in compression, the latter being more environmentally-friendly than the first. The secondary circuit distributed cold water to the rooms to be cooled.

Two different working systems were analysed:

- 1) Operational conditions involving primary circuit (with R-22) 482.48 kPa (-1°C) and 1,752.44 kPa (45°C) pressure, evaporation and condensation temperatures (in that order); 8.5°C and 10°C chilled water temperature in the initial impulse and the return were considered for the secondary circuit; and
- 2) Partial load scheme characterised by 460.91 kPa (-2°C) and 1,799.52 kPa (48.2°C) for pressure, evaporation and condensation temperatures, ensuring that water temperature remained unchanged.

Taking the work schemes for nominal conditions and partial installation which have been previously described as a starting point, the *Matlab* function detailed in section 1.6 was used.

Developing a *Matlab* function for evaluating the system

A function was created in *Matlab* to minimise computation time integrating the networks for each of the system's working areas. The following aspects were defined as input variables: suction and discharge pressures and degrees of overheating and undercooling (if present in the cycle).

The function thus provided the refrigerant's properties at each point of the primary refrigeration circuit. Figure 4 shows the algorithm for calculating refrigerant properties at different primary circuit points.

Integrating this function to a sub-programme including equations for the system's thermodynamic behaviour led to creating an analysis set for air conditioning systems with no need for using specialised software which was difficult to adapt to the specifications required by the evaluators.

Thermodynamic analysis of the whole central heating system's water

Some aspects were considered when making a thermodynamic analysis of the system. They were related to reference state temperature in both primary (R-22, 25°C) and secondary refrigerant (cold water, 10°C). Gas compression was considered to be adiabatic and the system's exergy flows were modified by adding the highest negative exergy power values, thus changing the scale by

valor de la corriente exergética negativa cambiando la escala por descenso del sistema de referencia, con el objetivo de convertir las exergías negativas en positivas y no contradiciéndose así las leyes termodinámicas.

reducing the reference system. All this was aimed at turning negative exergy into positive ones without contradicting the laws of thermodynamics.

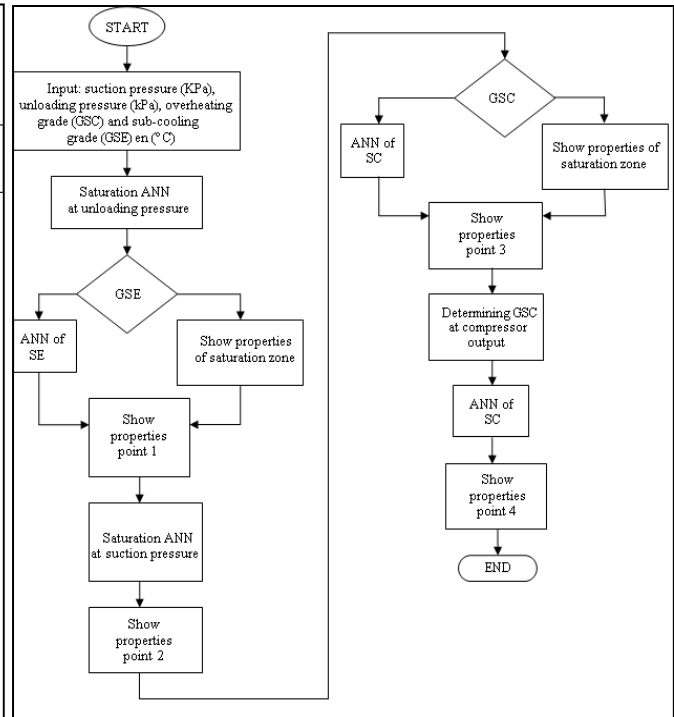
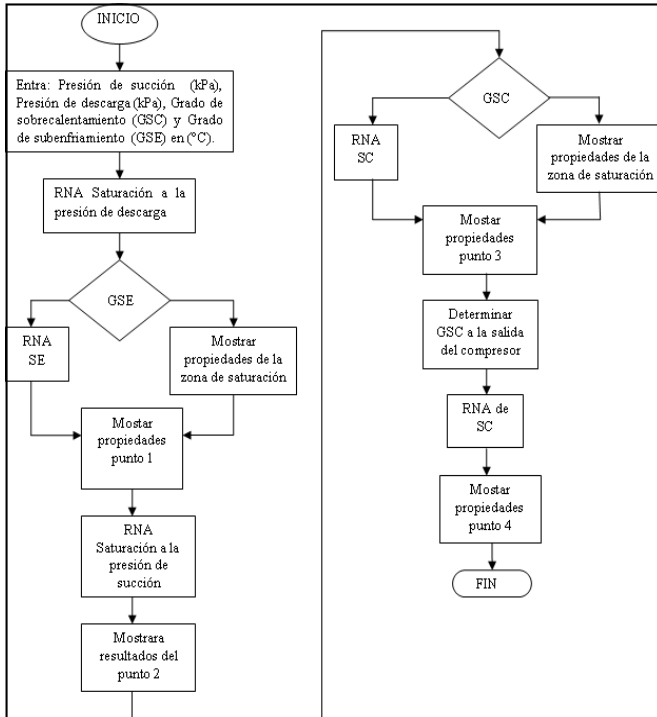


Figura 4. Función desarrollada en Matlab para determinación de propiedades termodinámicas en cada punto del circuito primario de refrigeración.

Figure 4: Matlab function developed for determining thermodynamic properties at each primary cooling circuit point

Con la función que calcula las propiedades del R-22 en cada punto del ciclo, combinada con el subprograma que tiene implícitas las ecuaciones que describen el comportamiento termodinámico del sistema, se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 1.

The function also led to calculating R-22 properties at each point of the cycle. The results provided in Table 1 were obtained from combining the sub-programmes with equations describing the system's thermodynamic behaviour.

Tabla 1. Análisis exergético del sistema

COMPONENTES	RÉGIMEN NOMINAL	RÉGIMEN PARCIAL
Condensador	Exergía (kW)	Exergía (kW)
Entrada	22,60	23,24
Salida	17,83	14,05
Mecanismo de expansión		
Entrada	17,83	14,05
Salida	9,99	10,88
Evaporador		
Entrada	9,99	10,88
Salida	0	0
Compresor		
Entrada	32,55	33,86
Salida	22,02	23,24
Rendimiento	60%	59%
Flujo de refrigerante (kg/s)	0,71	0,71
Rendimiento isentrópico	0,73	0,71
Rendimiento volumétrico	0,82	0,80
Calor absorbido (kJ/kg)	149,22	150,93
Trabajo de compresión (kJ/kg)	32,23	33,96
COP	4,62	4,44

Table 1: Exergy analysis system

COMPONENT	RATED STATE	PARTIAL STATE
Condenser	Exergy (kW)	Exergy (kW)
Input	22.60	23.24
Output	17.83	14.05
Expansion Mechanism		
Input	17.83	14.05
Output	9.99	10.88
Evaporator		
Input	9.99	10.88
Output	0	0
Compressor		
Input	32.55	33.86
Output	22.02	23.24
Performance	60%	59%
Refrigerant flow (kg/s)	0.71	0.71
Isentropic performance	0.73	0.71
Volumetric performance	0.82	0.80
Absorbed heat (kJ/kg)	149.22	150.93
Compression work (kJ/kg)	32.23	33.96
COP	4.62	4.44

Analizando la tabla 1 puede observarse cómo al variar las condiciones de trabajo de la instalación, de régimen nominal a parcial, disminuyó la eficiencia de ésta tanto en el estudio energético como en el exergético, lo que a su vez se traduce en un aumento del consumo energético de la instalación. Esto puede corroborarse comparando el trabajo realizado por el compresor al variar las condiciones nominales de la instalación, que aumentó aproximadamente en un 5%.

Análisis de irreversibilidades por componentes

Haciendo uso de las funciones obtenidas en *Matlab* se determinan las irreversibilidades locales por cada componente con el objetivo de evaluar la destrucción de exergía en cada uno de ellos y cuantificar cuánto representa cada componente en las irreversibilidades totales del sistema. Asimismo, la tabla 2 brinda la comparación desde este mismo punto de vista entre los regímenes de trabajo estudiados con el objetivo de ubicar aquellos componentes que fueron más sensibles ante las variaciones experimentadas por la instalación.

Tabla 2. Análisis de irreversibilidad por componentes

Componentes	Régimen nominal	Régimen parcial		
	I_l (kW)	% (I_l/I_T)	I_l (kW)	% (I_l/I_T)
Condensador	4,76	14,38	9,18	27,15
Mecanismo de expansión	7,84	23,68	3,17	9,38
Evaporador	9,99	30,16	10,85	32,07
Compresor	10,52	31,77	10,62	31,39
I_T	33,12		33,83	

Nota: I_l : Irreversibilidad local, I_T : Irreversibilidad total

Como se puede observar en la tabla 2, el compresor es el elemento más irreversible en un sistema de refrigeración por compresión de vapor debido a que se le suministra energía de alta calidad (exergía pura), la cual es transferida al refrigerante; y posteriormente, parte de ésta, es cedida en el proceso de condensación sin realizar trabajo útil. El evaporador y el mecanismo de expansión, respectivamente, siguen al compresor con pérdidas exergéticas significativas, sumando entre todas 85,62% de las irreversibilidades totales del sistema. Como punto interesante en el estudio se observa cómo el condensador funge como elemento organizador en el proceso (menos irreversible), con el fin de llevar a la sustancia de trabajo a condiciones favorables para que se logre el efecto final de la instalación.

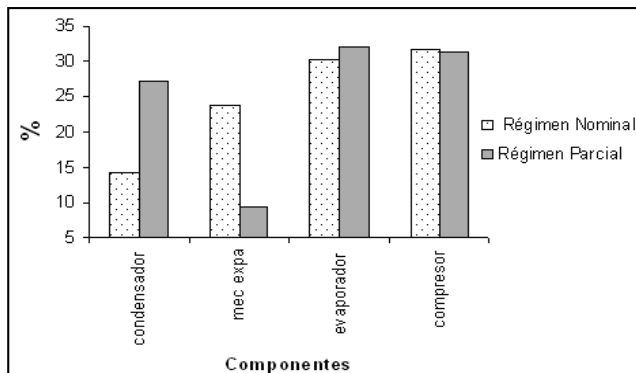


Figura 5. Irreversibilidades relativas por componentes.

Analizando la tabla 2 desde el punto de vista de cómo varía el comportamiento exergético de cada componente al cambiar las

Table 1 shows that modifying working conditions in the installation (from nominal to partial scheme) resulted in decreased efficiency in both energy and exergy studies, in turn, resulting in increased energy consumption. This can be corroborated by analysing compressor work when nominal installation conditions were modified; in fact, it increased by around 5%.

Irreversibility component analysis

Using Matlab functions led to determining local irreversibility for each component to evaluate exergy destruction and to quantify each component's impact on total system irreversibility. Table 2 provides a comparison between working schemes which have been studied to date to locate components that were more influenced by changes in the installation.

Tabla 2: Irreversibility component analysis

Component	Rated state	Partial state		
	I_l (Kw)	% (I_l/I_T)	I_l (kW)	% (I_l/I_T)
Condenser	4.76	14.38	9.18	27.15
Expansion mechanism	7.84	23.68	3.17	9.38
Evaporator	9.99	30.16	10.85	32.07
Compressor	10.52	31.77	10.62	31.39
I_T	33.12		33.83	

Note: I_l : local irreversibility I_T : total irreversibility

Table 2 shows that the compressor is the most irreversible element in a refrigeration system through vapour compression since it is provided with quality energy (pure exergy) that is transferred to the coolant and then part of it is transferred during condensation, performing no useful work. The evaporator and expansion mechanism, in that order, are next in the list presenting significant exergy losses. These three elements represent 85.62% of all total system irreversibility. An interesting feature highlighted in this study was capacitor function as process organiser (less irreversible) to conduct the working fluid to favourable conditions and eventually achieve the final installation effect.

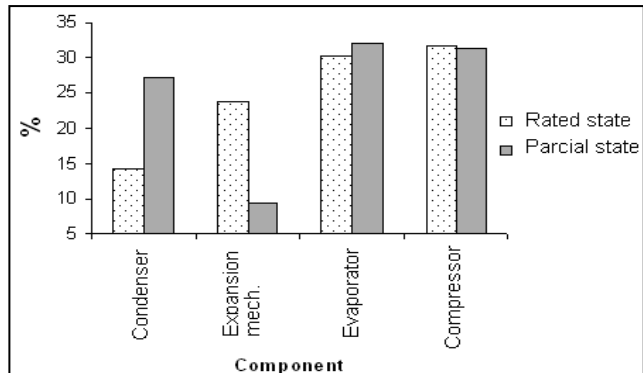


Figure 5: Irreversibility-related component

It was observed when analysing Table 2 regarding each component's exergy variation that the most sensitive components were

condiciones de operación del sistema, se detecta que los componentes más sensibles son el condensador y el mecanismo de expansión, según se muestra en la figura 5.

Dada la alta sensibilidad de estos componentes ante las variaciones descritas, es muy importante controlar las condiciones de trabajo del sistema de climatización, actuando sobre aquellos parámetros que afecten la eficiencia de éste.

Del circuito de refrigeración, el condensador es un elemento muy sensible a cambios de presión, por cuanto su operación depende de la temperatura ambiente y en función de ella va a variar la presión en él, pudiéndose actuar sobre estos cambios con el control de velocidad de los equipos que impulsan el fluido de enfriamiento del condensador (de ventiladores o bombas cuando sea enfriado por aire o agua respectivamente), tomando como variable de control la presión de condensación.

El mecanismo de expansión resulta un caso particular. Para que el sistema opere debe existir un cambio brusco de sección transversal que lleva a la sustancia de trabajo de un alto potencial energético a uno de menor calidad sin realizar trabajo útil, y por tanto, una pérdida exergética tecnológicamente no aprovechable, sobre la cual no se puede incidir para reducirla.

Conclusions

1. El análisis de destrucción de exergía por componentes del ciclo de refrigeración por compresión de vapor indica como más irreversible al compresor y al evaporador, los cuales reportan una incidencia alrededor de un 60% de las irreversibilidades totales del sistema, por tanto deben ser monitoreados ante cualquier variación en la instalación.
2. El análisis de sensibilidad ante la variación de las condiciones de trabajo de la instalación mostró cuán sensible puede resultar el cambio de parámetros de trabajo en el consumo energético de la instalación; para el caso analizado el cambio de presiones de trabajo del sistema trajo consigo un aumento de éste realizado por el compresor en el orden de un 5%, aumentando por dicho efecto la potencia consumida por esta máquina y disminuyendo el coeficiente de funcionamiento del ciclo en el orden de un 4%.
3. La creación de la función desarrollada en *Matlab* obtenida en el cuerpo del trabajo resulta una herramienta muy útil y flexible para su adaptación a otros estudios en la evaluación de sistemas de climatización, constituyendo así una primera fase de una posterior optimización termoeconómica de sistemas de climatización centralizados.
4. Se muestran las potencialidades del uso de herramientas de inteligencia artificial para la determinación de propiedades y simulación de sistemas térmicos con un alto grado de precisión, integrando modelos de RNA y AG en el desarrollo de modelos físicos por componentes y del modelo termodinámico del sistema, lo cual resultaría de forma más compleja por otros métodos convencionales.
5. El alto consumo energético de los sistemas de climatización demuestran la necesidad de investigar, tanto la concepción del diseño conceptual del sistema, como los costos exergoeconómicos y el impacto global total sobre el medio ambiente que representan estos sistemas.

the condenser and expansion mechanism as a system's operating conditions varied (Figure 5).

Given these components' great sensitivity to the previously described type of variations, it became very important to control air conditioning system working conditions and modify parameters negatively affecting its efficiency.

As part of the cooling circuit, the capacitor is a very sensitive element, mostly to pressure changes; its functioning and pertinent pressure changes therefore depend on environmental temperature. One change that could be introduced would be controlling the speed of the machinery pumping the condenser's cooling fluid (fans or pumps when it comes to air or water cooling, in that order). Condensation pressure would be considered as control variable.

The expansion mechanism constitutes a particular case. There must be an abrupt change in cross-section for the system to operate, leading the working substance from high energy potential to lower quality energy potential having no useful work. An unprofitable exergy loss thus occurs (from a technological point of view). There is no way of reducing this loss.

Conclusions

1. The analysis of exergy destruction for each refrigeration cycle component through vapour compression indicated that the most irreversible elements were the compressor and the evaporator. Both elements accounted for around 60% of total system irreversibility; they should therefore be monitored for any variation in the installation;
2. The analysis of installation sensitivity to changes in working conditions showed how sensitive changing working parameters may be regarding energy consumption. In this specific case, the change in the system's operating pressure resulted in an increase in the compressor's work (around 5%), thereby increasing power consumption and decreasing the cycle's operation coefficient by around 4%;
3. Creating the function developed in *Matlab* led to a very useful, flexible tool to be adapted to other studies evaluating air conditioning systems. It also constitutes the first stage of subsequent thermo-economic optimisation of central air conditioning systems;
4. Artificial intelligence tools provide the potential for determining properties and high accuracy thermal system simulation. ANN and AG models have thus been integrated into developing physical models of components and thermodynamic modelling of systems. This procedure would be more complex if developed with other conventional methods; and
5. Air conditioning systems' high energy consumption proves that there is a need for research from the perspective of conceptually designing a system's exergoeconomic costs and general impact on the environment that these types of system represent.

Referencias / References

- Armas Teyra, M. A., Gómez Sarduy, J. R., Mariño Stand, L. Sepúlveda Chaverra, J., *Inteligencia Artificial Aplicada al Análisis de Sistemas Energéticos con Matlab.*, 2006, pp. 68-99.
- ASHRAE Handbook Fundamentals., *Thermophysical Properties of Refrigerants.*, 2009, pp. 30.1- 30.75.
- Boer, D., *Exergy and structural analysis of an absorption cooling cycle and the effect of efficiency parameters.*, *Int. J. of Thermodynamics*, ISSN 1301- 9724, Vol. 8, No. 4, 2005, pp. 191- 198.
- D'Accadia, M.D., Vanoli, L., *Thermoeconomic optimization of the condenser in a vapour compression heat pump International.*, *Journal of Refrigeration*, 27, 2004, pp. 433- 441.
- Kelly, S., Tsatsaronis, G., Morosuk T., *Advanced exergetic analysis: Approaches for splitting the exergy destruction into endogenous and exogenous parts.*, Elsevier Ltd., *Energy* 34, 2009, pp. 384- 391.
- Kotas, T.L., *The exergy method of Thermal Power Plants Analysis.*, ed. Ed. Anchon Brendon, Londres, 1985.
- Lapido, M. J., *Termodinámica Avanzada.*, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Ed. Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2006, pp. 4-81.
- Morosuk. T., Tsatsaronis, G., *Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids.*, *Energy*, Elsevier Ltd., 2009, pp. 1- 11.
- Sepúlveda Chaverra, J., *Inteligencia Artificial Aplicada al Análisis de Sistemas Energéticos con Matlab.*, 2006, pp. 68-99.
- Szargut, J.T., *Optimization of the design parameters aiming at the minimization of the depletion non-renewable resources.*, *Energy*, 2004.
- Tsatsaronis, G., Park, M.H., *On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems.*, *Energy Convers Manage*, 43, 2002, pp. 1259-70.
- Valero, A., Lerch, F., Serra L., Royo, J., *Structural theory and thermoeconomic diagnosis, Part II: Application to an actual power plant.*, *Energy conversion and management*, 43, 2002, pp. 1503- 1518.
- Yumrutas, R.M., Kunduz, M., Kano, M., *Exergy analysis of vapor compression refrigeration systems.*, *Exergy, an International Journal* 2, 2002, pp. 266-272.
- Xia, Z.-H. Z., Y., *The application of artificial neural network in HVAC system.*, *Machine Learning and Cybernetics*, Vol. 8, 2005, pp. 4800-4804.
- Zubair, S.M., *Thermodynamic optimization of finite time vapor compression refrigeration systems.*, *Energy conversion and management*, 2000.