

SELECCIÓN DEL REFRIGERANTE ALTERNATIVO APLICANDO LAS TÉCNICA AHP Y ANP

Díaz, P. P ^(P); García, M.

Abstract

In this paper, a method to select the best alternative refrigerating that complies with Montreal and Kyoto protocols using multi-criteria decision analysis, specifically AHP and ANP is proposed. Four refrigerating groups were selected, one synthetic (HFC) and three naturals like ammoniac, carbon dioxide and hydrocarbons. The four groups were evaluated by three experts under criteria such as performance, flammability, toxicity, global warming, ozone layer impact and economy. EC2000 and SuperDecisions software were used. According to AHP results, ammoniac is the best alternative refrigerant, while ANP results show hydrocarbons to be the best ones. Through this methodology the application of MCDM to solutions techno-economics was validated.

Keywords: alternative refrigerants, AHP, ANP

Resumen

El propósito de este trabajo es seleccionar el mejor refrigerante alternativo que cumpla con las normas de los Protocolos de Montreal y Kyoto utilizando dos Técnicas de Decisión Multicriterio Discretas, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el Proceso de Redes Analíticas (ANP). Para ello se seleccionaron tres familias de refrigerantes naturales y uno de tipo sintético; como lo son: el amoníaco, el dióxido de carbono, los hidrocarburos y los HFC (Hidrofluorocarbonados) que aún no tienen restricciones gubernamentales. Estos fueron evaluados por tres expertos considerando criterios como: Desempeño, Flamabilidad, Toxicidad, Calentamiento Global, Agotamiento de la capa de Ozono y Económico. Se utilizó el software EC 2000 [Expert Choice 2000 Team. Pittsburg: Expert Choice, Inc.; 2001] para AHP y Super Decisions 1.6.0 para ANP. Según los resultados del análisis realizado por AHP se puede afirmar que la mejor opción como refrigerante alternativo es el Amoniaco, pero ANP arroja resultados diferentes, priorizando a los Hidrocarburos como el mejor refrigerante alternativo. Mediante esta metodología se puede validar la aplicación de las MCDM a soluciones tecno-económicas.

Palabras Clave: Refrigerantes Alternativos, Impacto Ambiental, AHP, ANP

1. Introducción

La historia de la refrigeración se remonta a la primera mitad del siglo XIX y desde entonces la búsqueda de sustancias refrigerantes efectivas, eficientes y amigables al ambiente ha sido un objetivo en constante evolución. Una consecuencia de estos hechos es la desenfadada carrera establecida por los principales laboratorios y fabricantes para hallar sustitutos de los refrigerantes prohibidos. Primero en una fase que no requiera la modificación sustancial de los equipos (refrigerantes drop in) y posteriormente en otra que utilizaría los refrigerantes llamados definitivos, que sí requeriría la modificación de los equipos o la construcción de nuevos. Esta carrera aún no ha terminado y por lo tanto no se puede afirmar que existan determinados refrigerantes consensuados por todo el mundo como sustitutos de los prohibidos. Además, el problema se ha complicado con otro hecho a

tener en cuenta en los próximos años: se ha abierto un debate internacional sobre el efecto de determinados gases, entre ellos los refrigerantes, sobre el efecto invernadero, responsable del tan controvertido cambio climático, fenómeno que cada vez menos lo niegan. Así resulta que algunos refrigerantes propuestos como sustitutos definitivos porque son benignos para la capa de ozono no lo son para el efecto invernadero.

No existe un refrigerante ideal ni que pueda ser universalmente adaptable a todas las aplicaciones. Entonces, un refrigerante se aproximará al ideal, sólo en tanto que sus propiedades satisfagan las condiciones y necesidades de la aplicación para la que va a ser utilizado. Los aspectos relevantes cuando se selecciona un refrigerante varían desde diversos puntos de vista, como lo son los aspectos técnicos, operativos, eficiencia, disponibilidad, costos, impacto ambiental y seguridad industrial; además del criterio de las aplicaciones, requerimientos y necesidades, por tal motivo también juega papel importante la opinión de los expertos. Además, debido a la gran variedad y diversidad de opciones que existen en el mercado actual, el cual es una industria que está en constante evolución y a la par con las exigencias tecnológicas y ambientales de los consumidores, deben tenerse en cuenta estos criterios para la selección de un refrigerante alternativo. Para establecer la solución de este problema orientado hacia la selección del mejor refrigerante alternativo, se evaluarán en conjunto criterios de selección y alternativas definidas con la aplicación de dos Técnicas de Decisión Multicriterio Discretas, que son: proceso analítico jerárquico (AHP) y proceso analítico en red (ANP), las cuales se desarrollarán con la ayuda de los software "Expert Choice 2000" para AHP y "Super Decisions 1.6.0" para ANP.

El método de Jerarquías Analíticas (AHP), se introdujo por primera vez por Saaty [1], consiste en formalizar nuestra comprensión intuitiva de problemas complejos utilizando una estructura jerárquica. El propósito de AHP es permitir que el decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, dándole la forma de una jerarquía de atributos. AHP descompone la decisión de un problema en varios niveles de tal manera que forman una jerarquía. El AHP asume un modelo de relación jerárquica unidireccional entre los niveles de decisión [2]. En AHP, el elemento superior de la jerarquía es el objetivo general del modelo de decisión. Se descompone la jerarquía desde los atributos generales hasta los más específicos bajo un nivel manejable de los criterios de decisión. AHP es conceptualmente fácil de utilizar, pero es divisionalmente robusto a fin de que pueda manejar la complejidad de los problemas reales [3]. En realidad, AHP es un marco amplio, se ha diseñado para modelar el mundo real de los problemas de toma de decisiones para múltiples objetivos, múltiples criterios, de múltiples expertos y decisiones con cualquier número de alternativas. Una de las ventajas del AHP frente a otros MCDM es que AHP está diseñado para incorporar tangibles, así como criterios intangibles en especial cuando los juicios subjetivos de los diferentes individuos constituyen una parte importante del proceso de decisión [4].

La parte medular del proceso de Saaty se encuentra en el mecanismo de obtención de pesos mediante la comparación por pares en cada nivel de la jerarquía, tomando en cuenta la "contribución" de cada elemento de esa jerarquía respecto de cada uno de los vértices inmediatamente superiores con los cuales se encuentra vinculado [5]. La comparación por pares se realiza en términos de "razones de importancia" si se trata de criterios, sobre la base de una escala numérica de nueve puntos propuesta por Saaty [1] Puede ocurrir que en el proceso de comparaciones se obtenga algún grado de inconsistencia, la cual es mensurable y permite al decisor ajustar en coordinación con un grupo de expertos la asignación de nuevos puntajes para obtener una inconsistencia por debajo de 0.1 [5].

Por otro lado la técnica ANP es una forma general de AHP y no requiere estrictamente esta estructura jerárquica y por lo tanto, permite relaciones más complejas entre los niveles de decisión y los atributos [5]. ANP incorpora las dependencias y el intercambio de información utilizando un multinivel (o jerarquía), la decisión de red se adapta bien a las relaciones de dependencia (o interdependencia) entre los componentes del modelo, para representar y

analizar las interacciones, y para sintetizar sus efectos mutuos por un solo procedimiento. En la literatura, la aplicación de la ANP no es tan común como las aplicaciones de la AHP, pero campos de aplicación de la ANP están aumentando rápidamente [6]. La Técnica ANP se ha seleccionado para resolver el problema de selección de Refrigerantes, por las siguientes razones: ANP tiene un enfoque sistemático para establecer las prioridades y la relación de correspondencia entre los objetivos y los criterios [6]. ANP utiliza una relación de escala de juicios lógicos en lugar de escalas arbitrarias [7]. ANP puede medir todos los criterios tangibles e intangibles en el modelo para diferentes alternativas [6]. ANP es relativamente simple, con un enfoque intuitivo que puede ser aceptada por los directores y otros responsables en la toma de decisiones [7].

En la Tabla 1 se establece las diferencias más importantes entre el AHP y el ANP.

AHP	ANP
Solución de problemas complejos siguiendo un ordenamiento jerárquico.	Se utiliza para modelar sistemas interrelacionados.
En general en una jerarquía se busca la distribución de una propiedad (la meta) entre los elementos que son comparados, para juzgar cual influye o es influenciada o tiene más de esa propiedad.	Las redes buscan la distribución de la influencia de los elementos sobre algún elemento o algunos elementos con respecto a una propiedad.
Los elementos en cada nivel son comparados de acuerdo a la dominancia o influencia con relación a los elementos en el nivel inmediatamente superior a él.	Las comparaciones se hacen de acuerdo a la influencia dominante de cada elemento con otro elemento del mismo componente o de uno diferente.

Tabla 1. Diferencias entre AHP y ANP

2. Generalidades sobre refrigerantes

Un refrigerante se puede definir como cualquier cuerpo o sustancia que actúa como agente de enfriamiento absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia. Con respecto al ciclo *compresión-vapor*, el refrigerante es el fluido de trabajo del ciclo el cual alternativamente se vaporiza y se condensa absorbiendo y cediendo calor, respectivamente. Para que un refrigerante sea apropiado y se le pueda usar en el ciclo antes mencionado, debe poseer ciertas propiedades físicas, químicas y termodinámicas que lo hagan seguro durante su uso. No existe un refrigerante ideal ni que pueda ser universalmente adaptable a todas las aplicaciones. Entonces, un refrigerante se aproximará al ideal, sólo en tanto que sus propiedades satisfagan las condiciones y necesidades de la aplicación para la que va a ser utilizado. Debe hacerse énfasis en las propiedades y características más importantes para la selección del refrigerante adecuado.

2.1. Amoníaco

Aunque el amoníaco es tóxico, algo inflamable y explosivo bajo ciertas condiciones, sus excelentes propiedades térmicas lo hacen ser un refrigerante ideal para fábricas de hielo, para grandes almacenes de enfriamiento, etc., donde se cuenta con los servicios de personal experimentado y donde su naturaleza tóxica es de poca consecuencia. El amoníaco no destruye la capa de ozono y contribuye en muy bajo rango al efecto invernadero asociado al calentamiento global. El uso del amoníaco como refrigerante es consistente con los acuerdos internacionales de reducción del calentamiento global y destrucción de la capa de ozono, y debido a su aplicación probada como un refrigerante seguro y eficiente durante los últimos 150 años, está inmediatamente disponible para un

mayor uso y nuevas aplicaciones. Desde un punto de vista puramente económico, sin considerar las regulaciones innecesarias, el amoniaco debería de tener una mayor aplicación como refrigerante de la que actualmente cuenta. Desde un punto de vista operacional, el amoniaco es generalmente aceptado como un refrigerante industrial eficiente y económicamente efectivo, un importante beneficio para los consumidores ya que costos menores de operación representan un costo menor de los productos alimenticios.

2.2. Refrigerantes HFC

Hasta hace poco, la mayoría de los sistemas de refrigeración (aire acondicionado) utilizaban CFC (por lo general, R11 y R12). Como resultado del Protocolo de Montreal para proteger la capa de ozono de la tierra, se ha eliminado la utilización de los CFC en estas aplicaciones. En la mayoría de los casos, los sustitutos son los HCFC (normalmente R22 y R123). Aunque los HCFC sólo representan un 1/20 del potencial de agotamiento de la capa de ozono de los CFC, la utilización de los HCFC reduce considerablemente la capa de ozono. Los acuerdos internacionales ponen límites a la producción de HCFC y su uso se está eliminando de forma gradual desde de 2004. Hay varias clases de refrigerantes que tienen cero de agotamiento de potencial de la capa de ozono. Los más comunes son la sustitución de los HCFC, los HFC (R134a). Sin embargo, R134a es un gas de efecto invernadero y su liberación contribuye al calentamiento global. Las propiedades termodinámicas y físicas de los HFC y su baja toxicidad lo convierten en un reemplazo seguro y muy eficiente de los CFC en muchos segmentos de la refrigeración industrial, comercial y doméstica.

2.3. Dióxido de Carbono

El CO₂ es un gas inodoro, incoloro y no inflamable en condiciones atmosféricas. Existe de forma natural y es un producto de muchos procesos, como la fabricación de cerveza o amoniaco, y los mayores productores de dióxido de carbono son las centrales eléctricas. Se considera una de las principales causas del calentamiento global, lo que aumenta la preocupación de utilizarlo como refrigerante. No obstante, cuando se utiliza el CO₂ como refrigerante, el gas ya existía, y únicamente se le ha capturado, refinado y ubicado en un ciclo refrigerante. De hecho, aunque el gas sea liberado, no representa un incremento sobre el volumen total de CO₂ existente en la atmósfera. Incluso el dióxido de carbono emitido a la atmósfera al generar la energía necesaria para fabricar NH₃ es muy superior al requerido para fabricar CO₂. En consecuencia, el hecho de utilizar CO₂ como refrigerante no conlleva un impacto sobre el calentamiento global.

2.4. Hidrocarburos directos

Los hidrocarburos directos son un grupo de fluidos compuestos en varias proporciones de los dos elementos hidrógeno y carbono. Algunos son el **Metano, etano, butano, etileno e isobutano**. Todos son extremadamente inflamables y explosivos. Aunque ninguno de estos compuestos absorbe humedad en forma considerable, todos son extremadamente miscibles en aceite para todas las condiciones. Su uso ordinariamente está limitado a aplicaciones especiales donde se requieren los servicios de personal especializado. Las ventajas que los Hidrocarburos (HC) ofrecen son: sustitución directa "drop in", son más económicos y no requieren del uso de lubricantes nuevos y costosos, no dañan la capa de ozono, contribuyen en un menor grado al efecto invernadero, pueden fabricarse localmente (en las refinerías), se necesita menos cantidad de refrigerante (aproximadamente un 40%), alcanzan una reducción energética. Una desventaja es su inflamabilidad. Resulta conveniente señalar que las cargas usadas, además de ser inferiores a las comúnmente usadas con CFC-12, no llegan a ser mayores que las contenidas en dos encendedores de cigarrillos.

3. Metodología

Resulta complejo definir cuál sería el mejor refrigerante alternativo, dado que en el mercado actualmente existen gran variedad de opciones y cada uno de ellos tiene muy bien definidos sus ventajas, prioridades, ofrecen solución y justificativo a sus posibles desventajas. Por ello en el presente trabajo se propone usar dos técnicas de análisis multicriterio ampliamente contrastadas en la literatura como son el AHP y ANP para realizar dicha selección.

3.1. Definición de Criterios y Alternativas

Para la selección de un refrigerante los aspectos a considerar desde diferentes puntos de vista tales como técnicos, económicos, ambientales, sociales, seguridad industrial, hacen aún más dificultoso esta decisión. Dado lo anterior, para enfatizar de manera concreta los criterios y las alternativas que se van a utilizar en el desarrollo de los modelos AHP y ANP, por medio de la investigación y consultando algunas empresas y expertos en Venezuela, se definieron los criterios más relevantes dentro de las características que debe tener un refrigerante alternativo en la actualidad y se establecieron las alternativas según los cuatro grupos de refrigerantes definidos anteriormente. En la Tabla 2 se relacionan los criterios y alternativas definitivos.

Criterios	Observación	Alternativas
Desempeño	Se consideran los aspectos técnicos y de capacidad de refrigeración	Amoniaco
Flamabilidad	Aspectos relacionados Seguridad Industrial en la operación y manejo	Dióxido de Carbono (CO ₂)
Toxicidad	Aspectos relacionados Seguridad Industrial en la operación y manejo	HFC
Calentamiento Global	Aspectos relacionados con el efecto invernadero del refrigerante	Hidrocarburos (HC)
Agotamiento Capa de Ozono	Se refiere a presencia de sustancias agotadoras de la capa de Ozono	
Económico	Aspectos relacionados con los costos y disponibilidad del mercado	

Tabla 2. Definición de Criterios y Alternativas

3.2. Selección grupo de expertos

Los juicios para ponderar criterios y alternativas han de ser emitidos por expertos, teniendo en cuenta conocimientos, experiencia y manejo de la información relacionada con los refrigerantes alternativos en el mercado actual en Venezuela. La metodología a seguir para obtener la información de los expertos es mediante reuniones de consulta y desarrollo de encuestas (o cuestionarios) digitales en formato Word vía Internet; la encuesta se les envía por correo electrónico a los expertos, ellos la resuelven y regresan para su procesamiento, en AHP y ANP. El grupo de colaboradores para la prueba piloto de la metodología en el proceso de evaluación / decisión, está conformado por tres ingenieros conocedores, con amplia experiencia en el tema de los refrigerantes alternativos; pertenecientes a tres compañías involucradas con los aspectos técnicos y ambientales.

3.3. Ponderación de criterios y priorización de alternativas para el Modelo AHP

El Modelo Jerárquico desarrollado para AHP, se establece a partir de la definición de los criterios y las alternativas, representado en la Figura 1. En la parte superior del control jerárquico, se encuentra el objetivo del problema. El objetivo es determinar la mejor decisión estratégica, a saber, el mejor refrigerante. Para la Ponderación de los criterios y priorización de las alternativas se generan cuestionarios, que son enviados al grupo de expertos para su respectivo desarrollo. Como producto de estos cuestionarios se obtienen valores para ser ponderados y calculados con la ayuda del software Expert Choice 2000, con la opción multi-experto; con estos resultados se priorizan las alternativas.

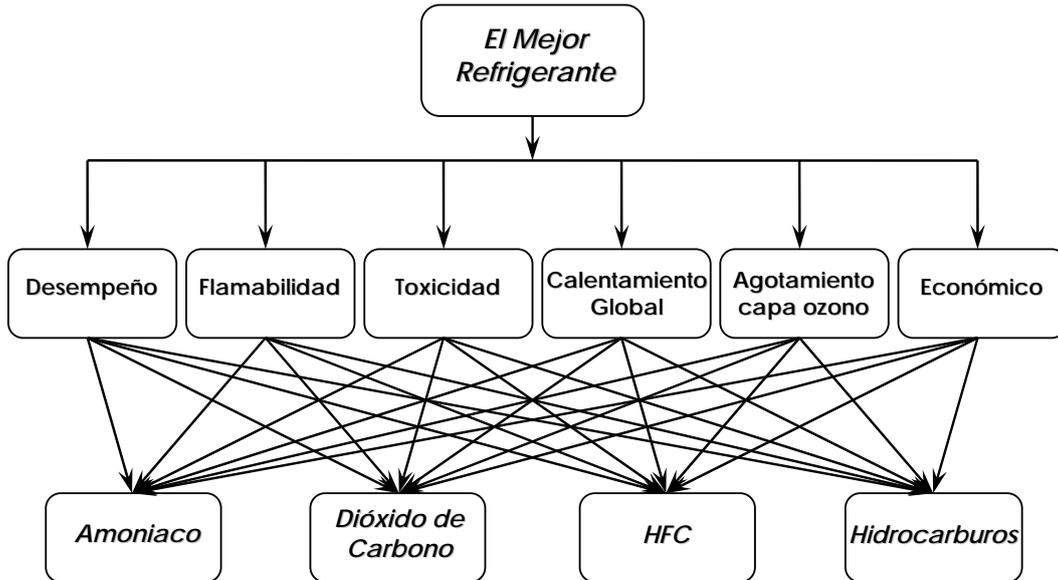


Figura 1. Modelo Jerárquico para AHP

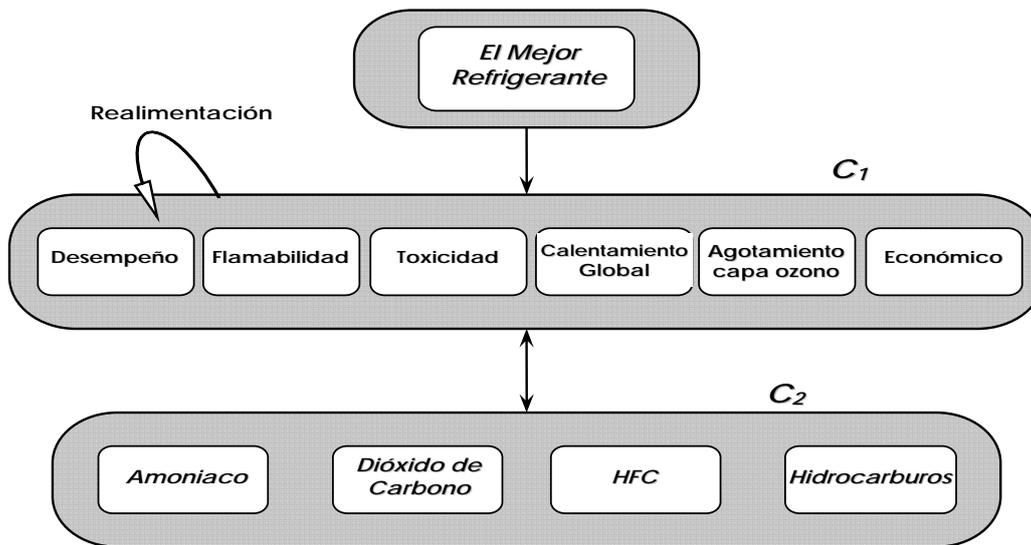


Figura 2. Modelo en Red para ANP

3.4. Ponderación de criterios y priorización de alternativas para el Modelo ANP

El Modelo desarrollado para ANP, es un acoplamiento de dos partes. La primera incluye un control jerárquico o red de criterios y Alternativas que controla las interacciones. El segundo

es una red de influencias entre los criterios y las alternativas (ver Figura 2). Para definición de las influencias entre criterios y alternativas se generan cuestionarios, que son enviados al grupo de expertos para su respectivo desarrollo. Como producto de estos cuestionarios se obtienen valores para ser ponderados y calculados con la ayuda del software Super Decisions 1.6.0, previo a la introducción de los datos al Super Decisions se calcula la media geométrica de los resultados de las evaluaciones del grupo de expertos, con estos resultados se priorizan las alternativas.

3.5. Obtención de la matriz de comparaciones pareadas

Después de definir ambos modelos y las conexiones necesarias se realizan las comparaciones pareadas, y se establecen las comparaciones para AHP. Para el caso de ANP, en reunión con el grupo de expertos se establecieron las influencias entre componentes, es decir se definió la matriz interfactorial (ver Figura 3), se definieron qué criterios tenían influencia entre sí, qué criterios tenían influencia sobre las alternativas; no se consideraron influencias entre alternativas; luego se establecen las comparaciones pareadas para ANP respectivamente. Con el fin de ponderar las comparaciones pareadas, se prepararon los cuestionarios por separado para AHP y ANP, los cuales son resueltos por el grupo de expertos. Las preguntas de estos cuestionarios están estructuradas de acuerdo a las conexiones que relacionan cada grupo de criterios y las relaciones entre criterios y alternativas.

Componentes			E ₁₁	E ₁₂	E ₁₃	E ₁₄	E ₁₅	E ₁₆	E ₂₁	E ₂₂	E ₂₃	E ₂₄	
C ₁	Desempeño	E ₁₁	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
	Flamabilidad	E ₁₂	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	
	Toxicidad	E ₁₃	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	
	Calentamiento Global	E ₁₄	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	
	Agotamiento Capa de Ozono	E ₁₅	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	
	Económico	E ₁₆	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	
C ₂	Amoniaco	E ₂₁	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	
	Dióxido de Carbono	E ₂₂	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	
	HFC	E ₂₃	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	
	Hidrocarburos	E ₂₄	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	Total
No. De Preguntas			12	3	9	12	6	16	6	6	6	6	82

Figura 3. Matriz Interfactorial para ANP

Para el modelo AHP, como resultado de las comparaciones, en primer lugar se obtuvo la matriz para los pesos de los criterios y luego se obtuvieron 6 matrices, cada una de ellas para las ponderaciones de las alternativas con respecto a cada uno de los criterios.

Para el modelo ANP, como resultado de las comparaciones, en el componente 1 (Criterios de Selección) se obtuvieron 12 matrices, 6 de ellas con las influencias para las ponderaciones entre criterios con respecto a cada uno de los criterios y las 6 restantes con las influencias para las ponderaciones entre alternativas con respecto a cada uno de los criterios. En el componente 2 (Alternativas) se obtuvieron 4 matrices, cada una de ellas con las influencias para ponderaciones entre criterios con respecto a cada una de las alternativas. Se consideró que las alternativas no son influyentes entre sí.

Se tomó la escala valores entre 1 y 9 recomendada por Saaty [1]. Las escalas de valoración en las comparaciones pareadas son aquellas, en donde 1 es igual importancia (o influencia para ANP), 3 es moderada importancia (o Influencia para ANP), 5 es fuerte importancia (o influencia para ANP), 7 es muy fuerte importancia (o influencia para ANP), y 9 es de extrema importancia (o influencia para ANP). Incluso los números que se sitúen en valores intermedios entre los niveles también se tienen en cuenta.

4. Resultados y Análisis

4.1. Modelo AHP

Se utilizó para el análisis el software Expert Choice 2000, un total de 7 matrices pareadas se introdujeron en el programa, a través de la creación del listado de Criterios y el listado de Alternativas; se trabajó con la opción Multi-Experto, donde al final se obtuvieron los resultados combinados para los diferentes juicios de los expertos. Se efectuó un control en la consistencia de las respuestas de los expertos, a medida que se fueron introduciendo los valores para cada una de las matrices pareadas y cada uno de los expertos. Con el objetivo de obtener matrices pareadas consistentes, la relación de inconsistencia debe ser inferior a 0.1. Una vez verificada la inconsistencia en el software, se presentaron varias matrices con inconsistencia superior a 0.1. Para solucionarlo se llamaron nuevamente a los expertos y se les plantearon de nuevo las preguntas relacionadas con las inconsistencias de las matrices pareadas, y de este modo llegar a un consenso con relación de inconsistencias menores a 0.1. Al realizar los respectivos cálculos y síntesis en el Expert Choice, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4 donde se observa la ponderación de los criterios y en la Figura 5 donde se muestran la priorización de las Alternativas, para AHP.

Se puede observar claramente, en la Figura 4, que los criterios ambientales tienen mayor peso sobre los otros criterios, destacándose en primer lugar el criterio de agotamiento de la capa de ozono con un peso de 36%, seguido del calentamiento global con un 16.7%, la flamabilidad, el desempeño y la toxicidad están muy próximos al calentamiento global, en cambio el criterio económico está con el peso más bajo con un 4.9%. Según los resultados de la Figura 5, podemos concluir que el mejor refrigerante es la alternativa Amoniaco con un peso de 30,1%, según AHP modo de síntesis distribuido; le sigue como segunda opción los Hidrocarburos con 27.9%, muy próximo el Dióxido de carbono con un 26.9% y por último la alternativa de los HFC con 15.2%.

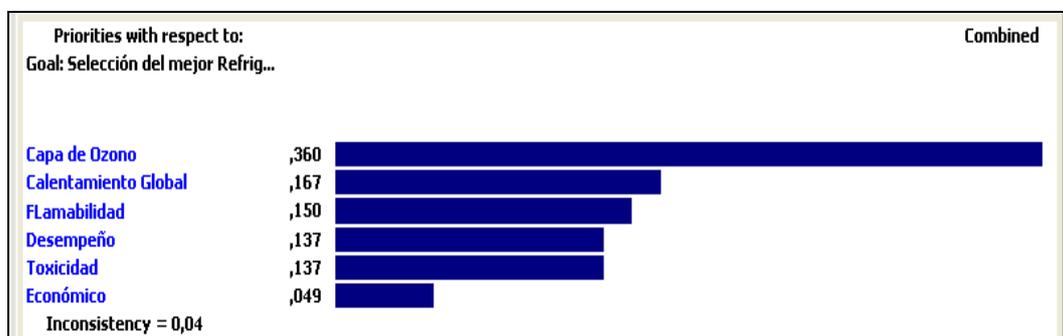


Figura 4. Ponderación de los criterios para AHP

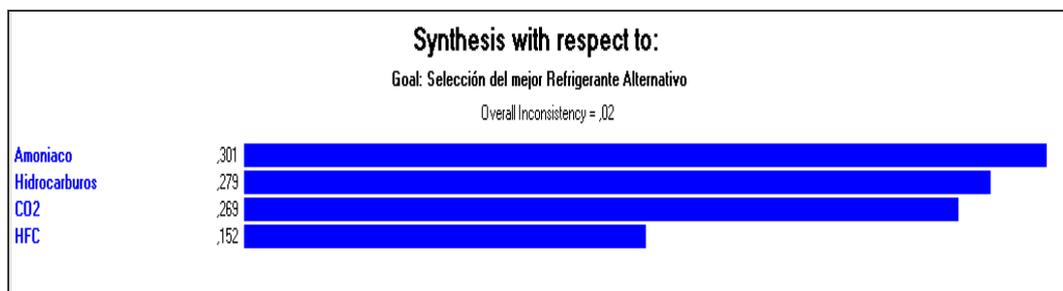


Figura 5. Priorización de las alternativas para AHP.

4.2. Modelo ANP

Se utilizó para el análisis el software Super Decisions 1.6.0. Un total de 14 matrices pareadas se introdujeron en el programa, a través de la creación de 2 cluster que representan cada uno de los componentes, un primer cluster de Criterios y un segundo cluster de Alternativas. Se efectuó un control en la consistencia de las respuestas de los expertos, a medida que se fueron introduciendo los valores para cada una de las matrices pareadas. El software Super Decisions va calculando la inconsistencia para cada una de ellas. Con el objetivo de obtener matrices pareadas consistentes, la relación de inconsistencia debe ser inferior a 0.1. Después obtener los valores de la media geométrica de las sentencias de cada uno de los expertos y verificar la inconsistencia en el software, sólo una matriz tuvo una inconsistencia de 0.1318, la de ponderación entre criterios, para la alternativa HFC. Como el valor por encima de 0.1 no era muy alto, se decidió dejarlo así, sin la necesidad de volver a plantearle nuevamente los cuestionamientos respectivos al grupo de expertos. Al realizar los cálculos y síntesis en el Super Decisions, se priorizan las alternativas obteniéndose las diferentes supermatrices. En la Figura 6 se representa la supermatriz original, en la Figura 7 se representa la supermatriz ponderada y en la Figura 8 se muestra la supermatriz límite; Todas las columnas de la supermatriz límite son iguales y sus valores indicarán la prioridad global de los elementos de la red.

		Alternativas				Criterios					
		Amoniaco	Dioxido de Carbono	HFC	Hidrocarburos	Calentamiento Global	Capa de Ozono	Desempeño	Económico	Flamabilidad	Toxicidad
Alternativas	Amoniaco	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.152184	0.000000	0.172149	0.136823	0.000000	0.357225
	Dioxido de Carbono	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.151531	0.000000	0.143340	0.119154	0.000000	0.054951
	HFC	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.080651	0.500000	0.083842	0.073394	0.000000	0.060426
	Hidrocarburos	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.115633	0.000000	0.100670	0.170629	0.500000	0.027398
Criterios	Calentamiento Global	0.070261	0.321308	0.000000	0.059535	0.000000	0.000000	0.108477	0.129431	0.145222	0.122579
	Capa de Ozono	0.000000	0.000000	0.355653	0.000000	0.000000	0.000000	0.207380	0.141073	0.145222	0.122579
	Desempeño	0.333689	0.395448	0.425561	0.135966	0.235074	0.088692	0.000000	0.140546	0.000000	0.000000
	Económico	0.084822	0.182042	0.132446	0.112384	0.145804	0.262710	0.034672	0.000000	0.209556	0.254842
	Flamabilidad	0.000000	0.000000	0.000000	0.692115	0.065019	0.074299	0.149471	0.048532	0.000000	0.000000
	Toxicidad	0.511228	0.101203	0.086340	0.000000	0.054104	0.074299	0.000000	0.040418	0.000000	0.000000

Figura 6. Supermatriz Original

		Alternativas				Criterios					
		Amoniaco	Dioxido de Carbono	HFC	Hidrocarburos	Calentamiento Global	Capa de Ozono	Desempeño	Económico	Flamabilidad	Toxicidad
Alternativas	Amoniaco	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.304369	0.000000	0.344298	0.273647	0.000000	0.714450
	Dioxido de Carbono	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.303063	0.000000	0.286680	0.238307	0.000000	0.109902
	HFC	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.161303	1.000.000	0.167683	0.146788	0.000000	0.120853
	Hidrocarburos	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.231266	0.000000	0.201339	0.341258	1.000.000	0.054795
Criterios	Calentamiento Global	0.070261	0.321308	0.000000	0.059535	0.000000	0.000000	0.216954	0.258862	0.290444	0.245158
	Capa de Ozono	0.000000	0.000000	0.355653	0.000000	0.000000	0.000000	0.414759	0.282146	0.290444	0.245158
	Desempeño	0.333689	0.395448	0.425561	0.135966	0.470147	0.177384	0.000000	0.281092	0.000000	0.000000
	Económico	0.084822	0.182042	0.132446	0.112384	0.291608	0.525419	0.069344	0.000000	0.419111	0.509684
	Flamabilidad	0.000000	0.000000	0.000000	0.692115	0.130037	0.148598	0.298942	0.097065	0.000000	0.000000
	Toxicidad	0.511228	0.101203	0.086340	0.000000	0.108207	0.148598	0.000000	0.080836	0.000000	0.000000

Figura 7. Supermatriz Ponderada

		Alternativas				Criterios					
		Amoniaco	Dioxido de Carbono	HFC	Hidrocarburos	Calentamiento Global	Capa de Ozono	Desempeño	Económico	Flamabilidad	Toxicidad
Alternativas	Amoniaco	0.083494	0.083494	0.083494	0.083494	0.083494	0.083494	0.083494	0.083494	0.083494	0.083494
	Dioxido de Carbono	0.054538	0.054538	0.054538	0.054538	0.054538	0.054538	0.054538	0.054538	0.054538	0.054538
	HFC	0.086990	0.086990	0.086990	0.086990	0.086990	0.086990	0.086990	0.086990	0.086990	0.086990
	Hidrocarburos	0.108312	0.108312	0.108312	0.108312	0.108312	0.108312	0.108312	0.108312	0.108312	0.108312
Criterios	Calentamiento Global	0.089031	0.089031	0.089031	0.089031	0.089031	0.089031	0.089031	0.089031	0.089031	0.089031
	Capa de Ozono	0.106467	0.106467	0.106467	0.106467	0.106467	0.106467	0.106467	0.106467	0.106467	0.106467
	Desempeño	0.149849	0.149849	0.149849	0.149849	0.149849	0.149849	0.149849	0.149849	0.149849	0.149849
	Económico	0.130232	0.130232	0.130232	0.130232	0.130232	0.130232	0.130232	0.130232	0.130232	0.130232
	Flamabilidad	0.117382	0.117382	0.117382	0.117382	0.117382	0.117382	0.117382	0.117382	0.117382	0.117382
	Toxicidad	0.073705	0.073705	0.073705	0.073705	0.073705	0.073705	0.073705	0.073705	0.073705	0.073705

Figura 8. Supermatriz Límite

Una vez conocidos los valores de la supermatriz límite podemos priorizar las alternativas obteniendo como resultado final las ponderaciones mostradas en la Figura 9. Según los resultados mostrados en la Figura 9, podemos concluir que el mejor refrigerante es la alternativa Hidrocarburos con un 32.49%, según ANP; le sigue como segunda opción los HFC con 26.09%, en tercer lugar el Amoniaco con 25.04% y por último la alternativa de Dióxido de carbono con un 16.36%. En cuanto a la ponderación de los criterios, podemos observar en la Figura 8 que el peso del criterio desempeño tiene un mayor valor sobre los otros criterios, con un peso de 0.1498, seguido del criterio económico con un 0.1302, luego el criterio flamabilidad con 0.1173, luego el agotamiento de la capa de ozono con 0.1064 y seguido del calentamiento global con 0.089, y por último el criterio toxicidad con el peso más bajo de un 0.073.



Figura 9. Resultados de la Priorización de las Alternativas para ANP

5. Conclusiones.

AHP ha sido una herramienta eficaz para la determinación de la estructura de los criterios y la ponderación de los mismos, tanto desde el punto de vista conceptual como práctico. En relación con la solución del objetivo principal del trabajo, seleccionar el mejor refrigerante, se obtuvieron respuestas diferentes para AHP y ANP, debido a sus diferentes metodologías de cálculo y de cuestionamientos pareados.

Para el caso de AHP los expertos se orientaron hacia la definición de que es lo más importante a la hora de seleccionar un refrigerante, y de hecho las repuestas llevaron a darle mayor ponderación a los criterios de la parte ambiental, a diferencia del ANP donde se le dio mayor ponderación a los criterios desempeño y económico, por que lo que se estaban cuestionando los expertos es lo que más influye a la hora de seleccionar un refrigerante

alternativo y cambiaron las ponderaciones en las encuestas para ANP. Otro factor que afectó las diferencias de solución entre AHP y ANP, fue el número de expertos, puesto que podría considerarse que 3 expertos no fue suficiente, pero lo que quería validarse era la metodología CDMA en la selección del mejor refrigerante.

El análisis de sensibilidad en AHP nos indica que los porcentajes de las alternativas sí cambian variando el peso de los criterios, pero en la mayoría de los casos se mantiene la alternativa Amoniaco como la mejor opción, la alternativa CO2 pasa a ser la segunda, los Hidrocarburos bajan al tercer lugar y los HFC se mantienen en el último. Pero el cambio representativo se dio cuando se aumentó en 10% el criterio Toxicidad, dejando como mejor opción a los Hidrocarburos, seguido de CO2 y luego Amoniaco y por último los HFC. Se aumentó en un 25% el criterio flamabilidad y la alternativa CO2 pasó a ser la mejor opción quedando el amoniaco en segundo lugar.

Debido a estos tipos de cuestionamientos y al desarrollo de las diferentes técnicas, en el caso del AHP la mejor alternativa fue el amoniaco y para el caso del ANP fueron los Hidrocarburos, pero comparando el Amoniaco con Hidrocarburo en el AHP la diferencia fue del 3% y en ANP fue del 7%, pero en el AHP los Hidrocarburos fueron la segunda opción, a diferencia que en ANP el Amoniaco fue la tercera opción. En el AHP la alternativa CO2 tiene mayor peso que los HFC, en cambio en el ANP sucede lo contrario los HFC tienen mayor peso que el CO2.

En relación a la comparación de las dos herramientas, los expertos emitieron su opinión indicando que el resultado utilizando ANP es más apegado a la realidad, y presenta mayor aproximación al orden como están ponderados los criterios, aunque esta herramienta presenta el inconveniente de requerir más tiempo para su ejecución tanto para modelaje como para el proceso comparativo que cuando es utilizado AHP y requeriría un mayor número de participantes. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios dado que se ajustan bastante a la realidad y según lo conversado con los expertos, les interesa profundizar más en este tipos de metodologías, porque para definir algo que al parecer es muy técnico pero que debido a la gran variedad de criterios que maneja y de alternativas en el mercado se podría llegar plantear estas técnicas como una posible solución a este problema.

Referencias

- [1] Saaty TL. Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process. AHP series, vol. VI. RWS Publications; 2000. 478 pp.
- [2] Meade LM. A methodology for the formulation of agile critical business processes. Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Arlington in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. The University of Texas at Arlington; May 1997.
- [3] Salo AA, Hamalainen RP. On the measurement of preferences in the analytic hierarchy process. *J Multi-Criteria Decision Anal* 1997;6:309–19. S., Erdogmus, et al. / *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10 (2006) 269–279 277
- [4] Mohanty RP, Deshmukh SG. Use of analytic hierarchic process for evaluating sources of supply. *Int J Phys Distribution Logist Manage* 1993;23(3):22–8.
- [5] Saaty, Thomas L., "The Analytic Hierarchy Process. Planning, Priority Setting, Resource Allocation", Mc Graw Hill, 1980.
- [6] Saaty TL. Fundamentals of the analytic network process. Kobe Japan: ISAHP; August 12–14 1999.

[7] Saaty, Thomas L., "Decision making with dependence and feedback. The analytical network process", Pittsburgh: RWS Publications, 2001.

Correspondencia

Pedro Pablo Díaz Jaimes

Autopista Petare Guarenas, Urbanización Terrazas del Ávila, Universidad Metropolitana
UNIMET, Departamento de Energética Escuela de Ingeniería Mecánica. Código Postal 1070.
0058-4142356944, 0058-2122403509