

METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE REFRIGERANTES ALTERNATIVAS ECOLÓGICAS Y EFICIENTES ENERGÉTICAMENTE

METHODOLOGY FOR THE SELECTION OF REFRIGERANTS ECOLOGICAL AND ENERGETICALLY EFFICIENT ALTERNATIVES

Carlos Urrego Rodríguez*

Recibido: 8 de noviembre de 2017

Aceptado: 23 de abril de 2018

Resumen

Para seleccionar un refrigerante adecuado para un sistema de refrigeración o acondicionamiento de aire se deben tener en cuenta ciertas variables termodinámicas que requieren ser controladas de manera conjunta. Desarrollar una metodología que integre parámetros de selección que contemplen los requerimientos del sistema, la protección ambiental, las instalaciones y seguridad del personal, además de la eficiencia energética, hará el proceso más amigable técnicamente. La metodología propuesta se enmarca en un modelo de decisión multicriterio de los parámetros establecidos por estándares y normas que permitirá al usuario-lector definir de una manera más sencilla el refrigerante que le brinde las mejores prestaciones, compaginando también los requerimientos del proyecto con diferentes sustancias, cuyas propiedades cubran sus necesidades de manera eficiente. Los hallazgos muestran que los refrigerantes naturales constituyen una alternativa importante como sustancias frigorigenas para sustituir los refrigerantes sintéticos.

Palabras clave: alternativa, ecología, eficiencia, metodología, refrigerantes, selección.

Abstract

To select a suitable refrigerant for a refrigeration or air conditioning system, certain thermodynamic variables must be taken into account, that need to be controlled together. To develop a methodology that integrates selection parameters that contemplate the requirements of the system, environmental protection, facilities and personnel security, in addition to energy efficiency, will make the process technically friendlier. The proposed methodology is framed in a multicriteria decision model of the parameters established by standards and norms that will allow the user - reader to define, in a simpler way, the refrigerant that provides the best benefits, also combining the requirements of the project with different substances, whose properties cover their needs efficiently. The findings show that natural refrigerants are an important alternative as refrigerant substances to replace synthetic refrigerants.

Keywords: alternative, ecology, efficiency, methodology, refrigerants, selection.

* Ingeniero mecánico. Experto en Refrigeración y Climatización. Docente investigador, Grupo de Investigación en Térmicas y Fluidos-GITEF, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3233-5596>. carlos.urrego@profesores.uamerica.edu.co

INTRODUCCIÓN

Sustancias naturales como el amoníaco, el dióxido de carbono, los hidrocarburos y el agua constituyeron los principales refrigerantes en los sistemas de refrigeración y climatización, en los comienzos de la refrigeración industrial. A inicios del siglo XX y como parte del avance industrial mundial, se desarrollaron los refrigerantes sintéticos, los cuales, por contener componentes destructores de la capa de ozono, debieron ser controlados y posteriormente eliminados. Como consecuencia de la salida de estos refrigerantes, se desarrollaron refrigerantes que no dañan la capa de ozono, pero tienen una alta incidencia en el calentamiento global, aspecto por el cual se ha decidido su eliminación gradual hasta el año 2040. Como respuesta a esta situación, nuevamente se han considerado los refrigerantes naturales como opción ecológica. Este artículo presenta una metodología de selección de refrigerantes a partir de sus propiedades, para facilitar a los interesados la generación de sus propios conceptos acerca del uso de refrigerantes eficientes y más amigables con el ambiente. La selección se basa en un método de decisión multicriterio de los parámetros establecidos por estándares y normas.

METODOLOGÍA

El proceso de análisis de las sustancias refrigerantes seleccionadas se ha desarrollado utilizando la siguiente información:

- Preselección de los refrigerantes actualmente en uso
- Propiedades ambientales y de seguridad
- Propiedades termodinámicas
- Propiedades físicas
- Origen de las sustancias

Los parámetros de selección de refrigerantes están de acuerdo con las teorías física y química que soportan la aplicación de estas sustancias en el campo operativo.

Con base en la Metodología de Ponderación Lineal Scoring, se establecieron calificaciones numéricas para los parámetros a comparar.

Método de ponderación lineal Scoring

Es un método de evaluación y decisión multicriterio de tipo compensatorio, en el cual se asigna un valor o peso a los criterios o alternativas del sistema que se desea evaluar.

Refrigerantes más representativos a nivel mundial

Una muestra de los refrigerantes más utilizados actualmente a nivel mundial, descartando aquellos que han sido retirados del comercio por disposición del Protocolo de Montreal, se presenta en la tabla 1.

Propiedades de los refrigerantes

Para realizar un análisis comparativo objetivo, se tendrán en cuenta las principales propiedades de las sustancias refrigerantes presentadas en la tabla 1.

Tabla 1. Refrigerantes más utilizados

Identificación	Nombre químico	Fórmula química
R 22	Clorodifluorometano	CHClF ₂
R 134a	1,1,1,2-Tetrafluoroetano	CH ₂ FCF ₃
R 170	Etano	CH ₃ CH ₃
R 290	Propano	CH ₃ CH ₂ CH ₃
R 600	Butano	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃
R 600a	2-Metilpropano (Isobutano)	CH(CH ₃) ₃
R 1270	Propileno	CH ₂ CHCH ₃
R 717	Amoníaco	NH ₃
R 744	Bióxido de carbono	CO ₂
R 404A (HP62)	Mezcla HFC (R125-R143a-R134a) (44 %-52 %-4 %)	-
R407C	Mezcla HFC-HFD (R134a-R125-R32) (52 %-25 %-23 %)	-
R410A	Mezcla HFC-HFD (R125-R32) (50 %-50 %)	-
MO29 (R402D)	Mezcla HFC-HC (R134a-R125- R 600a) (31.5 %-65.1 %-3.4 %)	-
MO49 (R413A)	Mezcla HFC (R134a-PFC218-R600a) (88 %-9 %-3 %)	-
MO59 (R417A)	Mezcla HFC-HC (R125-R134a-R600) (46.6 %-50 %-3.4 %)	-
MO79 (R422A)	Mezcla HFC-HC (R125-R134a-R600a) (85.1 %-11.5 %-3.4 %)	-
HFO 1234yf	2,3,3,3-Tetrafluoropropeno	CF ₃ CFCH ₂
R507	Mezcla HFC (R125-R143a) (50 %-50 %)	-

Nota. Elaborada a partir de fichas técnicas de los fabricantes de los productos (ver referencias)

Ambientales y de seguridad

Las propiedades ambientales y de seguridad se presentan en la tabla 2, siendo el potencial agotador de ozono-PAO (ODP por sus iniciales en inglés) y el potencial de calentamiento global-PCG (GWP por sus iniciales en inglés) los factores con alta relevancia en el momento de seleccionar un refrigerante.

Tabla 2. Propiedades ambientales y de seguridad

Refrigerante	PAO (ODP)	PCG (GWP) 100 años	Clasificación de seguridad	Inflamabilidad % de volumen en el aire	Temperatura de autoignición
R134a	0	1430	A1	N/A	743 °C
R600	0	3	A3	LFL 1.4 % UFL 9.5 %	365 °C
R 600a	0	3	A3	LFL 1.85 % UFL 8.5 %	460 °C
R 22	0.055	1700	A1	N/A	632 °C
R407C	0	1774	A1	N/A	-
R410A	0	2088	A1	N/A	-
R 290	0	3	A3	LFL 2.1 % UFL 9.5 %	470 °C
R 404A	0	3922	A1	N/A	-
R 170	0	3	A3	LFL 3.0 % UFL 12.5 %	515 °C
R 717	0	0	B2	LFL 16 % UFL 25 %	651.1 °C
R 744	0	1	A1	N/A	-
R 1270	0	2	A3	LFL 2.1 % UFL 11.1 %	455 °C
MO29 (R402D)	0	2230	A1	N/A	-
MO49 (R413A)	0	1085	A1	N/A	-
MO59 (R417A)	0	1950	A1	N/A	-
MO79 (R422A)	0	2530	A1	N/A	-
HFO 1234yf	0	4	A2L	LFL 6.2 % UFL 12.3 %	405 °C
R507	0	3985	A1	N/A	750 °C

Nota. Elaborada a partir de fichas técnicas de los fabricantes de los productos (ver referencias).

Termodinámicas y físicas

Las propiedades termodinámicas y físicas se presentan en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Propiedades termodinámicas

Refrigerante	Temperatura de congelación a 1.013 bares	Temperatura de evaporación a 1.013 bares	Presión de condensación a 25°C	Temperatura crítica a 1.013 bares	Presión crítica absoluta
	°C	°C	kPa	°C	kPa
R134a	-103.3	-26.5	665.7	101.2	4067
R600	-138.29	-0.54	242.65	151.98	3796
R 600a	-159.6	-11.75	-	134.66	3629
R 22	-160.0	-40.76	1044	96.15	4988
R407C	-	-43.5	1174	86.74	4620
R410A	-	-51.58	1650	72.13	4926
R 290	-187.3	-42.1	951.8	96.7	4248

Refrigerante	Temperatura de congelación a 1.013 bares	Temperatura de evaporación a 1.013 bares	Presión de condensación a 25°C	Temperatura crítica a 1.013 bares	Presión crítica absoluta
R 404A	-	-46.45	1254.67	72.07	3731
R 170	-182.8	-88.6	7.87	32.3	4872
R 717	-77.74	-33.33	98.8	132.5	11330
R 744	-56.57	-78.5	-	31.1	7377
R 1270	-185.25	-47.8	1158	92.42	4665
MO29 (R402D)	-	-43	1220	79.5	3903
MO49 (R413A)	-	-43	778	102.5	4120
MO59 (R417A)	-	-39	985	87.1	4039
MO79 (R422A)	-	-47	1274	71.7	3750
HFO 1234yf	-	-29.55	673	94.7	3382
R507	-	-46.9	1274	70.9	3793

Nota. Elaborada a partir de fichas técnicas de los fabricantes de los productos (ver referencias)

Tabla 4. Propiedades físicas

Refrigerante	Masa molar	Densidad líquido a 1.013 bares en el punto de ebullición	Densidad vapor a 1.013 bares en el punto de ebullición	Volumen específico en fase vapor a 1.013 bares	Calor latente de vaporización a punto de ebullición
	kg/mol	kg/m ³	kg/m ³	m ³ /kg	kJ/kg
R134a	102.03	1376	5.278	0.2035	216.92
R600	58.12	601.26	27.093	0.3949	385.71
R 600a	58.12	593.821	28.265	0.3786	365.101
R 22	86.47	1.409.172	47.039	0.2262	233.75
R407C	86.20	1134	4.6	0.2242	249.9
R410A	72.59	1062	4.12	0.2569	276
R 290	44.10	581	2.427	0.441	425.5
R 404A	97.61	1048	5.41	0.1955	200
R 170	30.07	543.83	2.054	0.5166	489.4
R 717	17.03	681.97	0.889	11.853	1369.5
R 744	44.01	763	1.83	0.3723	131.59
R 1270	42.08	504.45	1.762	0.4508	286.26
MO29 (R402D)	109.9	1144	5.88	0.1763	190.22
MO49 (R413A)	103.7	1188	3.9	0.1868	211.6
MO59 (R417A)	109	1149	5.61	0.1808	197.9
MO79 (R422A)	116	-	6.25	0.1641	175.8
HFO 1234yf	114.04	-	5.98	0.1798	-
R507	98.9	1237	5.51	0.1925	200.5

Nota. Elaborada a partir de fichas técnicas de los fabricantes de los productos (ver referencias)

Origen

En la tabla 5 se presenta el origen de los refrigerantes de muestra.

Tabla 5. Origen de los refrigerantes

Refrigerante	Natural	Sintético
R134a		X
R600	X	
R 600a	X	
R 22		X
R407C		X
R410A		X
R 290	X	
R 404A		X
R 170	X	
R 717	X	
R 744	X	
R 1270	X	
MO29 (R402D)		X
MO49 (R413A)		X
MO59 (R417A)		X
MO79 (R422A)		X
HFO 1234yf		X
R507		X

Nota. Elaborada a partir de fichas técnicas de los fabricantes de los productos (ver referencias)

Diseño del experimento

El procedimiento para la aplicación del método Scoring consideró los siguientes criterios.

Delimitación del contexto de evaluación

Se preseleccionaron los refrigerantes más utilizados actualmente a nivel mundial, por sus características termodinámicas y sus condiciones ambientales. Se incluyeron los refrigerantes hidrocarbonados, con uso restringido debido a su inflamabilidad y se excluyeron aquellas sustancias consideradas nocivas por el Protocolo de Montreal y sus adendas.

Criterios de evaluación

Las propiedades de los refrigerantes consideradas como criterios de evaluación se categorizaron de la siguiente forma:

- Propiedades ambientales y de seguridad
- Propiedades termodinámicas
- Propiedades físicas
- Origen de las sustancias

Construcción de las escalas de evaluación

La escala de evaluación se estableció por categorías, de acuerdo con la siguiente clasificación de las propiedades:

- General
- Grupo
- Unidad

Construcción de las funciones de valor

Las funciones de valor se definieron numéricamente a partir de rangos utilizados en reglamentos y normas de referencia: los grupos generales tienen un valor de 10 para todas las categorías, dado que todas las propiedades son importantes, los grupos fueron cuantificados en 5 por la misma razón; los ítems de cada propiedad recibieron cuantificación numérica de mayor a menor de 5 a 0, dependiendo del impacto ambiental, la seguridad, las condiciones termodinámicas y físicas o el origen, que presente la propiedad a evaluar.

Ponderación de las escalas de evaluación

Al final, se calculó el ponderado total para cada ítem de cada propiedad.

Evaluación de las opciones

Con base en la cuantificación anterior se realizó la calificación de las propiedades de los refrigerantes de la muestra; al final se obtuvo el puntaje total para cada refrigerante.

Análisis de resultados

El análisis final se realizó con base en las ponderaciones totales obtenidas por los refrigerantes de la muestra.

Parámetros de selección de refrigerantes

De acuerdo con la teoría un refrigerante debe cumplir con los siguientes criterios:

Presiones de operación positivas

Las presiones de condensación y evaporación deben ser positivas y mayores a la presión atmosférica de 1.013 bar.

Temperatura de evaporación

La temperatura de evaporación debe ser baja.

Temperatura crítica por encima de la temperatura de condensación

La temperatura crítica del refrigerante debe estar por encima de 55 °C.

Temperatura de congelación por debajo de la temperatura de evaporación

La temperatura de congelación debe ser menor que la temperatura de evaporación.

Volumen específico en fase vapor, bajo

Debe ser lo más bajo posible. En fase vapor se considera una temperatura de 20 °C y la presión atmosférica de 1.013 bares para determinar el volumen específico.

Calor latente de vaporización, alto

El valor del calor latente de vaporización debe ser el más alto posible.

Densidad

Las densidades del refrigerante en fase líquida y vapor se utilizan para calcular los recipientes acumuladores, las líneas de líquido, los evaporadores, los condensadores y la línea de succión de los sistemas.

Entropía

Hace referencia a la energía del refrigerante en el proceso de compresión y se utiliza para determinar la temperatura de salida del refrigerante del compresor.

No debe ser tóxico ni venenoso y no debe ser explosivo ni inflamable

Los refrigerantes se han clasificado de acuerdo con el grado de toxicidad e inflamabilidad, según lo establecido en el Estándar 34 de ASHRAE.

No debe tener efecto sobre otros materiales

No deben tener efectos corrosivos ni afectar la estabilidad de los materiales.

Fácil detección cuando se presenten fugas

Los refrigerantes con moléculas más pequeñas los hace más fáciles de presentar fugas. Los refrigerantes con moléculas grandes tienen menor tendencia de fugas.

Miscibilidad con el aceite

El refrigerante y el aceite deben ser miscibles para garantizar el retorno del aceite al compresor y disminuir los depósitos en el evaporador.

No debe reaccionar con la humedad

La humedad absorbida altera las condiciones de operación de los sistemas.

Estable física y químicamente

La estabilidad física y química garantiza la correcta operación de los equipos.

Análisis cuantitativo comparativo

De acuerdo con los anteriores parámetros de selección de refrigerantes, ninguna sustancia cumple con los requerimientos como refrigerante ideal; lo importante es entonces determinar cuáles son las sustancias que cumplen con la mayor cantidad de características, para ser aceptadas como las más cercanas a ser ideales, para ser utilizadas en los procesos de refrigeración y acondicionamiento de aire.

A partir de las propiedades de los refrigerantes se realiza un análisis comparativo, teniendo en cuenta los siguientes aspectos para su selección:

Rango 1. Propiedades ambientales y de seguridad

- Mínimo impacto para el agotamiento de la capa de ozono
- Mínimo impacto para la generación de calentamiento global
- Nivel de toxicidad, bajo
- Nivel de inflamabilidad, bajo
- Temperatura de auto-ignición, alta

Rango 2. Propiedades termodinámicas y físicas

- Temperatura de evaporación baja, a presión atmosférica de 1.013 bares
- Presión de condensación baja
- Temperatura crítica mayor a 55 °C
- Calor latente de vaporización, alto
- Volumen específico en fase vapor, bajo
- Densidad en líquido o vapor, baja

Rango 3. Origen de los refrigerantes

- Origen

Aplicando el método Scoring, en las tablas 6, 7 y 8 se establecen las valoraciones, teniendo en cuenta el procedimiento descrito en el apartado “Diseño del experimento”; el valor unitario final se obtiene multiplicando el valor general por el valor del grupo y por el valor unitario de cada propiedad.

Tabla 6. Valoraciones rango 1

Valoración propiedades	Valor general	Valor grupo	Valor unitario	Valor unitario final
Propiedades ambientales	10			
ODP (PAO)		5		
ODP = 0			2	100
0 < ODP < 0.6			1	50
GWP (PCG)		5		
GWP < 100			4	200
101 < GWP < 1000			3	150
1001 < GWP < 2000			2	100
2001 < GWP < 3000			1	50
3001 < GWP			0	0
Propiedades de seguridad	10			
Clasificación de seguridad		5		
Nivel A: baja toxicidad			2	100
Nivel B: alta toxicidad			1	50
Clasificación de inflamabilidad		5		
Nivel 1: baja inflamabilidad			3	150
Nivel 2: media inflamabilidad			2	100
Nivel 3: alta inflamabilidad			1	50
Temperatura de autoignición		5		
Nivel 3: 601 °C < T			3	150
Nivel 2: 301 °C < T < 600 °C			2	100
Nivel 1: T < 300 °C			1	50

Tabla 7. Valoraciones rango 2

Valoración propiedades	Valor general	Valor grupo	Valor unitario	Valor unitario final
Propiedades termodinámicas	10			
Temperatura de evaporación		5		
Nivel 1: $T < -71\text{ °C}$			4	200
Nivel 2: $-70\text{ °C} < T < -51\text{ °C}$			3	150
Nivel 3: $-50\text{ °C} < T < -31\text{ °C}$			2	100
Nivel 4: $-30\text{ °C} < T$			1	50
Presión de condensación a 25 °C		5		
Nivel 1: $P < 100\text{ Kpa}$			4	200
Nivel 2: $101\text{ kPa} < P < 500\text{ kPa}$			3	150
Nivel 3: $501\text{ kPa} < P < 1000\text{ kPa}$			2	100
Nivel 4: $1001\text{ kPa} < P$			1	50
Temperatura crítica		5		
Nivel 1: $151\text{ °C} < T$			4	200
Nivel 2: $101\text{ °C} < T < 150\text{ °C}$			3	150
Nivel 3: $55\text{ °C} < T < 100\text{ °C}$			2	100
Nivel 4: $T < 55\text{ °C}$			1	50
Clasificación de inflamabilidad		5		
Nivel 1: baja inflamabilidad			3	150
Nivel 2: media inflamabilidad			2	100
Nivel 3: alta inflamabilidad			1	50
Temperatura de autoignición		5		
Nivel 3: $601\text{ °C} < T$			3	150
Nivel 2: $301\text{ °C} < T < 600\text{ °C}$			2	100
Nivel 1: $T < 300\text{ °C}$			1	50
Propiedades físicas	10			
Calor latente de vaporización		5		
Nivel 1: $601\text{ kJ/kg} < C_v$			4	200
Nivel 2: $401\text{ kJ/kg} < C_v < 600\text{ KJ/Kg}$			3	150
Nivel 3: $200\text{ kJ/kg} < C_v < 400\text{ kJ/kg}$			2	100
Nivel 4: $C_v < 200\text{ kJ/kg}$			1	50
Volumen específico en fase vapor		5		
Nivel 1: $v < 0.2000\text{ m}^3/\text{kg}$			4	200
Nivel 2: $-0.2001\text{ m}^3/\text{kg} < v < 0.4000\text{ m}^3/\text{kg}$			3	150
Nivel 3: $0.4001\text{ m}^3/\text{kg} < v < 0.6000\text{ m}^3/\text{kg}$			2	100
Nivel 4: $0.6001\text{ m}^3/\text{kg} < v$			1	50
Densidad de líquido		5		
Nivel 1: $d < 520\text{ kg/m}^3$			4	200
Nivel 2: $521\text{ kg/m}^3 < d < 800\text{ kg/m}^3$			3	150
Nivel 3: $801\text{ kg/m}^3 < d < 1100\text{ kg/m}^3$			2	100
Nivel 4: $1101\text{ kg/m}^3 < d$			1	50
Densidad de vapor		5		
Nivel 1: $d < 2\text{ kg/m}^2$			4	200
Nivel 2: $2.001\text{ kg/m}^3 < d < 3\text{ kg/m}^2$			3	150
Nivel 3: $3.001\text{ kg/m}^3 < d < 4\text{ kg/m}^3$			2	100
Nivel 4: $4.001\text{ kg/m}^3 < d$			1	50

Tabla 8. Valoraciones rango 3

Valoración propiedades	Valor general	Valor grupo	Valor unitario	Valor unitario final
Origen de refrigerantes	10			
Natural			2	20
Sintético			1	10

RESULTADOS

Análisis cuantitativo

De la valoración establecida, se determinó la ponderación total para cada refrigerante de la muestra, la cual se presenta en dos grupos, en los tres rangos, en las tablas 9 y 10.

Tabla 9. Resultado análisis grupo 1

Rango 1	R134a	R600	R600a	R22	R407C	R410A	R290	R404A	R170
Propiedades ambientales									
ODP (PAO)	100	100	100	50	100	100	100	100	100
GWP (PCG)	100	200	200	100	100	50	200	0	200
Propiedades de seguridad									
Clasificación de seguridad	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Clasificación de inflamabilidad	150	50	50	150	150	150	50	150	50
Temperatura de autoignición	150	100	100	150			100		100
Rango 2	R134a	R600	R600a	R22	R407C	R410A	R290	R404A	R170
Propiedades termodinámicas									
Temperatura de evaporación	50	50	50	100	100	150	100	100	200
Presión de condensación a 25 °C	100	1500		50	50	50	100	50	200
Temperatura crítica	150	200	150	100	100	100	100	100	50
Propiedades físicas									
Calor latente de vaporización	100	100	100	100	100	100	150	100	150
Volumen específico en fase vapor	150	150	150	150	150	150	100	200	100
Densidad de líquido	50	150	150	50	50	100	150	100	150
Densidad de vapor	50	150	150	50	50	50	150	50	150
Rango 3	R134a	R600	R600a	R22	R407C	R410A	R290	R404A	R170
Origen de refrigerantes	10	20	20	10	10	10	20	10	20

Tabla 10. Resultado análisis grupo 2

Rango 1	R717	R744	R1270	MO29	MO49	MO59	MO79	HFO 1234yf	R507
Propiedades ambientales									
ODP (PAO)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
GWP (PCG)	200	200	200	50	100	100	50	200	0
Propiedades de seguridad									
Clasificación de seguridad	50	100	100	100	100	100	100	100	100
Clasificación de inflamabilidad	100	150	50	150	150	150	150	100	150
Temperatura de autoignición	150		100					100	150
Rango 2	R717	R744	R1270	MO29	MO49	MO59	MO79	HFO 1234yf	R507
Propiedades termodinámicas									
Temperatura de evaporación	100	200	100	100	100	100	100	50	100
Presión de condensación a 25°C	200		50	50	100	100	50	100	50
Temperatura crítica	150	50	100	100	150	100	100	100	100
Propiedades físicas									
Calor latente de vaporización	200	50	100	50	100	50	50		100
Volumen específico en fase vapor	50	150	100	200	200	200	200	200	200
Densidad de líquido	150	150	200	50	50	50			50
Densidad de vapor	200	200	200	50	100	50	50	50	50
Rango 3	R717	R744	R1270	MO29	MO49	MO59	MO79	HFO 1234yf	R507
Origen de refrigerantes	20	20	20	10	10	10	10	10	10

Los resultados finales del análisis cuantitativo comparativo de los refrigerantes, con base en la ponderación establecida, se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados finales

Grupo 1	R134a	R600	R600a	R22	R407C	R410A	R290	R404A	R170
Total puntaje	1260	1520	1320	1160	1060	1110	1420	1060	1570
Grupo 2	R717	R744	R1270	MO29	MO49	MO59	MO79	HFO 1234yf	R507
Total puntaje	1670	1370	1420	1010	1260	1110	960	1110	1160

El valor promedio de las ponderaciones se ha calculado de la siguiente forma:

$$x = \frac{\sum \text{puntajes de las sustancias}}{\text{número de sustancias}}$$

$$x = \frac{22550}{18}$$

$$x = 1253$$

Considerando que 1253 es el valor promedio de las ponderaciones y se toma como referencia de selección, los refrigerantes que obtuvieron valores superiores a este promedio se constituyen en los más viables para ser aplicados en los sistemas de refrigeración y acondicionamiento de aire por tener la mayor cantidad de propiedades favorables; estos refrigerantes son: R134a, R600, R600a, R290, R170, R717, R744, R1270 y MO49.

Análisis cualitativo

Con base en los resultados cuantitativos obtenidos en el comparativo, se realizó un análisis cualitativo sobre las sustancias resultantes favorables.

Rango 1. Propiedades ambientales y de seguridad

De los nueve refrigerantes favorables, dos son sintéticos, R134a y MO49, con ODP = 0 y GWP de 1430 y 1085, respectivamente; los restantes son refrigerantes naturales con mínimos valores de afectación ambiental, R600, R600a, R290, R170, R717, R744 y R1270, con ODP=0 y GWP<3.

Los refrigerantes hidrocarbonados presentan inflamabilidad alta (3), el amoníaco R717 inflamabilidad baja (2) y los refrigerantes sintéticos no presentan inflamabilidad.

Los refrigerantes seleccionados presentan una baja toxicidad (A), excepto el amoníaco R717, que tiene una clasificación de media toxicidad (B). En caso de fuga de amoníaco, este produce desplazamiento del oxígeno del aire, razón por la cual a una persona expuesta se le dificulta respirar y ante una exposición prolongada, puede fallecer por insuficiencia respiratoria.

El R600 (butano) presenta el mayor riesgo de inflamabilidad, con un Límite Inferior (LFL) de 1.4% en volumen y un Límite Superior (UFL) de 9.5 % en volumen. El menor riesgo lo tiene el R717 (amoníaco) con un Límite Inferior (LFL) de 16 % en volumen y un Límite Superior (UFL) de 25% en volumen; el amoníaco tiene un fuerte olor característico que permite ser detectado rápidamente cuando se presenta una fuga mientras que los refrigerantes hidrocarbonados son inodoros, por eso los fabricantes adicionan odorizantes para minimizar los riesgos de detección en caso de fugas.

Con relación a la temperatura de autoignición, todos los refrigerantes favorables ambientalmente presentan temperaturas superiores a 365 °C, lo cual los hace confiables a partir de una instalación realizada bajo las normas técnicas establecidas.

Rango 2. Propiedades termodinámicas y físicas

Las presiones de condensación más bajas corresponden a los refrigerantes R600, R170 y R717 con valores menores a 243 kPa.

Las temperaturas de evaporación más bajas corresponden a los refrigerantes R170 y R744 con valores cercanos a -80 °C.

Todos los refrigerantes favorables tienen temperaturas críticas por encima de 55 °C, excepto el R170 y el R744, cuyas temperaturas críticas son cercanas a 30 °C.

Las temperaturas de congelación más altas corresponden al R717, con -77.74 °C, y el R744, con -56.57 °C.

Los refrigerantes que presentan el más bajo volumen específico en fase vapor son el MO49, con un valor 0.1868 m³/kg, y el R134a, con 0.2035 m³/kg.

El calor latente de vaporización más alto corresponde al refrigerante R717, con un valor de 1369.5 kJ/kg, y el refrigerante con más bajo calor latente de vaporización es del R744, con 131.59 kJ/kg.

Los refrigerantes con densidad más baja son los más indicados para lograr diseños más eficientes. De la muestra de sustancias seleccionadas, todas presentan densidades en fase líquida menores a 763 kg/m³ a excepción de R134a, con 1376 kg/m³, y MO49, con 1188 kg/m³; igualmente, en

fase vapor presentan densidades menores a 2.8265 kg/m^3 a excepción de R134a, con 5.278 kg/m^3 , y MO49, con 3.9 kg/m^3 .

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el proceso de selección realizado, los refrigerantes naturales representan la mejor alternativa como sustancias frigorígenas (tal como lo muestran los datos en las tablas), en comparación con los refrigerantes sintéticos R134a y MO49, seleccionados como sustancias favorables. Los mejores resultados se pueden obtener con la aplicación de sustancias como el amoníaco y el dióxido de carbono.

Los refrigerantes hidrocarbonados son una alternativa viable técnicamente por su mayor eficiencia térmica y energética; no obstante, por su inflamabilidad se requiere definir la cantidad de refrigerante a utilizar según el equipo, la capacidad, la aplicación y la ubicación del mismo; su viabilidad para instalaciones exitosas depende del diseño seguro de estas, para lo cual se deben aplicar normas como EN 378-1, EN 378-2, EN 378-3, EN 378-4, ISO 5149-1, ISO 5149-2, ISO 5149-3 e ISO 5149-4, entre otras.

La tabla 12 resume las principales propiedades de los refrigerantes seleccionados como favorables.

Tabla 12 . Resumen de propiedades refrigerantes seleccionados

Refrigerante	PAO (ODP)	PCG (GWP) 100 años	Clasificación de seguridad	Temperatura	Temperatura	Densidad	Densidad	Calor
				de congelación a 1.013 bares	de evaporación a 1.013 bares	líquido a 1.013 bares en punto de ebullición	vapor a 1.013 bares en punto de ebullición	latente de vaporización a punto de ebullición
				°C	°C	Kg/m ³	Kg/m ³	KJ/Kg
R134a	0	1430	A1	-103.3	-26.5	1376	5.278	216.92
R600	0	3	A3	-138.29	-0.54	601.26	27.093	385.71
R 600a	0	3	A3	-159.6	-11.75	593.821	28.265	365.101
R 290	0	3	A3	-187.3	-42.1	581	2.427	425.5
R 170	0	3	A3	-182.8	-88.6	543.83	2.054	489.4
R 717	0	0	B2	-77.74	-33.33	681.97	0.889	1369.5
R 744	0	1	A1	-56.57	-78.5	763	1.83	131.59
R 1270	0	2	A3	-185.25	-47.8	504.45	1.762	286.26
MO49 (R413A)	0	1085	A1	-	-43	1188	3.9	211.6

REFERENCIAS

Toskano, G. (2005). *El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores* (monografía de grado). Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Capítulo 12. *Refrigerantes*. (2013). Recuperado de <https://profedaza.files.wordpress.com/2013/04/refrigerantes.pdf>

Dupont. (2015) Ficha de datos de seguridad Isceón MO29 (R422D). Recuperado de https://www.oxigensalud.com/industria/documentos_pdf//gases_refrigerantes/R_422D_ficha_seguridad_1.pdf

- Dupont. (2017) Ficha de datos de seguridad Isceón MO49 (R437A). Recuperado de https://www.oxigensalud.com/industria/menu/gases_refrigerantes/gases_refrigerantes.aspx?opcion=9
- Dupont. (2017) Ficha de datos de seguridad Isceón MO59 (R417A). Recuperado de https://www.oxigensalud.com/industria/documentos_pdf//gases_refrigerantes/R_417A_ficha_seguridad_1.pdf
- Dupont. (2017) Ficha de datos de seguridad Isceón MO79 (R422A). Recuperado de https://www.oxigensalud.com/industria/documentos_pdf//gases_refrigerantes/R_422A_ficha_seguridad_1.pdf
- GasServei. (2012). Ficha técnica R134a. Recuperado de <http://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R134A.pdf>
- GasServei. (2012). Ficha técnica R404. Recuperado de <http://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R404A.pdf>
- GasServei. (2012). Ficha técnica R407C. Recuperado de <http://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R407C.pdf>
- GasServei. (2012). Ficha técnica R410A. Recuperado de <http://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R410A.pdf>
- GasServei. (2012). Ficha técnica R290. Recuperado de <http://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R290.pdf>
- GasServei. (2012). Ficha técnica HFO1234yf. Recuperado de http://www.gas-servei.com/images/Ficha_seguridad_1234yf.pdffile:///C:/Users/Usuario/Downloads/Isceon%20MO79%20-%20Propiedades,%20usos,%20almacenamiento%20y%20manejo.pdf
- GasServei. (2012). Ficha técnica R290. (2017). Recuperado de http://www.gas-servei.com/images/Ficha_de_seguridad_R_290_1.pdf
- GasServei. (2013). Ficha técnica R507 (2017). Recuperado de http://www.gas-servei.com/images/Ficha_de_seguridad_R_507_1.pdf
- Infra Air Products. (2013). Ficha técnica R600. Recuperado de <http://www.infra.com.mx/wp-content/uploads/2013/09/butano>
- Praxair. (2009). Ficha técnica R717. Recuperado de <http://www.praxair.com.uy/-/media/documents/hojas-de-datos-de-seguridad/amoniac.pdf>
- Praxair. (2009). Ficha técnica R744. Recuperado de <http://www.praxair.com.uy/-/media/documents/hojas-de-datos-de-seguridad/dioxido-de-carbono.pdf>
- Praxair. (2009). Ficha técnica R600a. (2017). Recuperado de <http://www.praxair.com.mx/-/media/documents/safety-data-sheets/isobutano-hds-p4613c-2004.pdf>
- Praxair. (2009). Ficha técnica R1270. (2017). Recuperado de <http://www.praxair.com.mx/-/media/documents/safety-data-sheets/propileno-hds-p4648j-2009.pdf>
- Praxair. (2013). Ficha técnica R22. Recuperado de http://fds.portalpraxair.es/Ficheros/FDSGASES/027_002.pdf
- Praxair. (2014). Ficha técnica R170. Recuperado de <http://www.praxair.com.mx/-/media/documents/safety-data-sheets/etano-hds-p4592e-2009.pdf>

