



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**VIGILANCIA TECNOLÓGICA DE SISTEMAS DE
CONSERVACIÓN CON CO₂**

Miguel Ángel Valencia Orozco

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química
El Carmen de Viboral, Colombia
2021



Vigilancia tecnológica de sistemas de conservación con CO₂

Miguel Ángel Valencia Orozco

Informe de práctica como requisito para optar al título de:
Ingeniero Agroindustrial

Asesores:

Waldir Augusto Pacheco Pérez
Magíster en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Jhonny Colorado Ríos
Doctor en Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química
El Carmen de Viboral, Colombia
2021

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
1. OBJETIVOS.....	5
1.1. General.....	5
1.2. Específicos.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	6
3. METODOLOGÍA.....	8
3.1. Etapa 1.....	8
3.2. Etapa 2.....	8
3.3. Etapa 3.....	8
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	9
4.1. Ecuación de búsqueda.....	9
4.2. Base de datos.....	9
4.3. Análisis de información.....	14
5. CONCLUSIONES.....	19
REFERENCIAS.....	20

RESUMEN

Los sistemas de conservación son clave para el desarrollo y expansión de las industrias de alimentos debido a la alta demanda energética y a la importancia que tienen para evitar cambios fisicoquímicos y microbiológicos en el almacenamiento de materias primas, producto en proceso y producto terminado. Debido al aumento en la productividad de Comestibles DAN S.A., se pretende adecuar una bodega de conservación a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un túnel de congelación para anular la tercerización de los servicios de almacenamiento y enfriamiento. Antes de realizar una inversión en la compra, instalación y adecuación de un sistema de este tipo, se debe revisar la normatividad vigente, proyecciones futuras, limitaciones de las tecnologías y las diferentes alternativas existentes para seleccionar el conjunto que mejor se ajuste a los requerimientos específicos de acuerdo a las condiciones de funcionamiento, las dimensiones del cuarto, la naturaleza y el volumen de los productos que se desea manejar. En este documento se aborda el uso de refrigerantes desde el punto de vista ambiental, las regulaciones que los rigen y el auge que recobran los de tipo natural como alternativa para mitigar el impacto ambiental que tienen estos ciclos para acondicionamiento de aire. Finalmente, se presenta un informe de vigilancia tecnológica acerca de los sistemas de conservación que utilizan CO_2 como gas refrigerante, haciendo una revisión de los aspectos técnicos y las modificaciones del ciclo. Para el desarrollo de la investigación, se determinó una ecuación de búsqueda que se empleó en la base de datos Scopus®, obteniendo un registro de publicación de artículos desde 1998 hasta 2020. La totalidad de artículos obtenidos con la ecuación de búsqueda se analizó con la herramienta Sci-Val de Scopus®, la cual permitió conocer la cantidad de publicaciones por año, entidades patrocinadoras, publicaciones por país y las áreas del conocimiento en las que se enmarcan los artículos. Luego, se seleccionaron los artículos publicados entre 2016 y 2020 para revisar la tendencia de las investigaciones para esta tecnología. En caso de que el artículo aplicara para el análisis, se evaluó el enfoque desarrollado, las modificaciones mecánicas propuestas por los autores y/o la comparación del rendimiento del ciclo con CO_2 versus otros refrigerantes. La información se contrastó con el mapa de co-ocurrencia de palabras clave realizado en el software VOSviewer, verificando la tendencia de las palabras clave a lo largo del tiempo para entender su evolución en aspectos técnicos y en referencia a las modificaciones al ciclo de refrigeración. Este informe es presentado como el primer objetivo específico del proyecto N.º 84480, inscrito en la convocatoria 904 del 2021 del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia, para el acceso a beneficios tributarios por inversión.

INTRODUCCIÓN

El efecto de los sistemas de congelación y refrigeración ha cobrado gran importancia debido al uso de diferentes gases refrigerantes y a su impacto sobre el medio ambiente, así como la eficiencia en su funcionamiento a nivel operativo. La incidencia ambiental de los gases refrigerantes se mide por su potencial de agotamiento de la capa de ozono y por su potencial de calentamiento global. La eficiencia del sistema se evalúa con el COP, que en español significa "coeficiente de rendimiento", y hace referencia a la razón entre el calor retirado y el trabajo neto realizado por el ciclo. (Bolaji & Huan, 2013) (Unidad Técnica Ozono, 2017)

La compañía Comestibles DAN S.A. cuenta con sistemas de congelación y refrigeración en la zona de adecuación de materias primas cárnicas, en la zona de empaque de producto terminado, en las cavas de almacenamiento de materias primas y producto terminado y en los túneles de congelación. Estos sistemas operaban inicialmente con refrigerantes del tipo hidroclorofluorocarbonos (HCFC), que fueron categorizados como gases de alto impacto a la capa de ozono según el Protocolo de Montreal en 1987. Adoptando el Protocolo, adhiriéndose al Convenio de Estocolmo y evaluando diferentes refrigerantes, la compañía proyectó el cambio de los refrigerantes HCFC y adecuación de los circuitos para introducir refrigerantes que no impacten la capa de ozono, por lo que se migró al hidrofluorocarbono (HFC) azeotrópico R-507 debido a su alta disponibilidad, comportamiento térmico, exigencia de pocas modificaciones a los ciclos con los que se cuenta y flexibilidad para trabajar a bajas y medias temperaturas de evaporación.

Debido al crecimiento de la compañía, se proyectó la compra de un sistema de congelación para una nueva cava de almacenamiento. Acogiéndose a la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, la compañía decidió adoptar el CO₂ como gas refrigerante en lugar de agua o amoníaco por las temperaturas de operación, costo de infraestructura y los requerimientos técnicos del personal de mantenimiento. Para justificar la decisión, se pretende desarrollar un informe de vigilancia tecnológica sobre sistemas que usen el CO₂ como gas refrigerante.

Según el informe realizado por el Programa ERICA (2012), la Inteligencia Competitiva es un proceso sistemático de recogida combinada de datos, información y testimonios, para una vez seleccionados, validados y organizados, ser analizados y sus resultados comunicados para facilitar la toma de decisiones. Su objeto es la comprensión anticipada de los cambios en el entorno de la organización que la practica para actuar en

consecuencia. Es una metodología con gran potencial para estudiar el grado de avance de diferentes tecnologías y para favorecer su apropiación.

Este proceso resulta importante porque:

1. Ayuda al proceso de toma de decisiones al detectar hechos que puedan afectar a la organización.
2. Las organizaciones se pueden anticipar de forma benéfica a los cambios de manera proactiva.
3. Reduce los riesgos y la incertidumbre que puede presentarse en el proceso de toma de decisiones.

Para el desarrollo de este proyecto, se desea trabajar con la base de datos Scopus® y utilizar su herramienta de análisis bibliométrico *Sci-val*, además de apoyarse en el software VOSviewer, con el fin de determinar el estado de la tecnología de conservación con CO₂ y el direccionamiento que se tiene en las investigaciones referentes a este tema. VOSviewer es una herramienta de software para construir y visualizar redes bibliométricas. Estas redes pueden incluir, por ejemplo, revistas, investigadores o publicaciones individuales, y pueden construirse sobre la base de la citación, el acoplamiento bibliográfico, la cocitación o las relaciones de coautoría. Por otro lado, *Sci-Val* es la herramienta propia de la base de datos Scopus® para el análisis bibliométrico de la información, donde se clasifica la información de cada artículo para mostrar un informe detallado de cantidad de publicaciones por año, universidades, autores, patrocinadores, entre otros.

Este tipo de análisis son usados en la justificación de proyectos de inversión con el ánimo de fortalecer los procesos de Investigación, Desarrollo e innovación en el sector productivo. De acuerdo a la convocatoria N.º 904 de 2021, el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia estimula la inversión privada en Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación, mediante la calificación de proyectos de investigación científica, desarrollo e innovación, cuya inversión sea realizada durante el año 2021 y vigencias fiscales siguientes, para el acceso a los beneficios tributarios por Inversión: deducción y descuento y crédito fiscal, acorde a lo estipulado en los artículos 158-1, 256, 258 y 256-1 del Estatuto Tributario. (Minciencias, 2021)

1. OBJETIVOS

1.1. General

- Identificar las tendencias en cuanto al uso de CO₂ en sistemas de conservación con el fin de conseguir información que permita validar la aplicación de esta en la industria de alimentos y en especial dentro de los sistemas de conservación de la empresa Comestibles DAN S.A. como objetivo específico del proyecto N.º 84480 de Minciencias.

1.2. Específicos

- Determinar una ecuación de búsqueda que permita la recopilación de información primaria y secundaria sobre el uso de CO₂ en sistemas de conservación, con el fin de estructurar una base de datos bibliográfica.
- Hacer un análisis bibliométrico de la base de datos extraída donde se discrimine por categorías la información obtenida de los artículos científicos.
- Realizar un informe científico de tipo analítico donde se consigne la información y los análisis bibliométricos realizados.

2. MARCO TEÓRICO

Los refrigerantes con alto potencial de agotamiento del ozono (PAO), pertenecientes al grupo clorofluorocarbonados (CFC) y HCFC, fueron prohibidos por el Protocolo de Montreal en 1987, para que en los países en desarrollo se eliminen completamente para el 2030, con el objetivo de proteger la capa de ozono. Los fabricantes de refrigerantes introdujeron los HFC en reemplazo de los CFC y los HCFC y empezó la preocupación por el efecto en el calentamiento global, por lo que en 2016 se aprueba la Enmienda de Kigali que incorporó en el Protocolo de Montreal la regulación en la producción y el consumo de futuros HFC, desembocando en la necesidad de la utilización de nuevos refrigerantes, por lo que los del tipo hidrocarburos (HC) y los naturales cobran gran importancia para aplicaciones industriales. (UN Environment Programme, 2019) (Unidad Técnica Ozono, 2020)

Los refrigerantes naturales ocurren en los ciclos químicos y biológicos de la naturaleza sin intervención humana; incluyen amoníaco (R-717), dióxido de carbono (R-744), dióxido de azufre (R-764), agua (R-718) y aire (R728); estos fueron el corazón de la industria de calentamiento, ventilación, aire acondicionado y refrigeración entre 1800 y 1930, hasta la invención de los refrigerantes sintéticos de alto rendimiento, cuyo aumento desenfrenado comenzó a causar el agotamiento del ozono y el calentamiento global, lo que obligó a las comunidades científicas y las industrias manufactureras a descartar el uso de los hidrocarburos halogenados en favor de los refrigerantes naturales. (Abas, y otros, 2018)

El dióxido de carbono (CO₂) es un refrigerante natural antiguo que tiene cero PAO y el Potencial de Calentamiento Global (PCG) efectivo más bajo. Es más pesado que el aire, no es tóxico, no inflamable, está abundantemente disponible en el aire, es un subproducto de muchas aplicaciones industriales, es económico, presenta una baja densidad de líquido y reduce el tamaño del sistema y la cantidad de carga. Los requisitos modernos de refrigeración y aire acondicionado exigen refrigerantes de punto de ebullición más bajo, temperatura crítica alta y presión crítica moderada. El R-744 tiene una capacidad de refrigeración 5,8 veces mayor a temperaturas críticas muy bajas en comparación con las temperaturas medias. La propiedad transcítica del CO₂ requiere una presión supercrítica para el rechazo del calor y se utiliza en este régimen en la mayoría de las aplicaciones de refrigeración y calefacción. (Abas, y otros, 2018)

Las limitaciones y desafíos típicos en el uso de CO₂ son: (a) la alta presión de operación de CO₂ requiere un equipo de trabajo y compresores especiales; (b) problema de transferencia de calor en dispositivos de expansión; (c)

debido a la alta limitación de descarga, se requiere un compresor transcrito de dos etapas para alcanzar la temperatura de congelación; (d) su sistema es más complejo, lo que agrega costos de componentes adicionales; (e) el rendimiento se ve afectado si la tasa de fuga es mayor; (f) estos no son adecuados para áreas de temperatura ambiente alta porque el sistema funciona por encima del punto crítico; (g) debido a la alta presión de trabajo, siempre se necesitan soldaduras de calidad especializadas, soldadores con licencia y se requiere acero y acero inoxidable (SS) para las tuberías. (h) son necesarias normas de seguridad especiales para el manejo de alta presión de CO₂. (Dilshad, Kalair, & Khan, 2019)

La aplicación de CO₂ en sistemas de refrigeración y acondicionamiento de aire ha promovido diferentes avances técnicos, por lo que existen circuitos en cascada para tener 2 circuitos a diferente temperatura, sistemas Booster, sistemas con eyectores, expansores de CO₂, circuitos con compresión paralela, sistemas con subenfriamiento y recuperadores de calor, donde el objetivo es aumentar la eficiencia térmica global. (Doerffel, Thomas, & Hesse, 2020)

3. METODOLOGÍA

La metodología se adaptó de la propuesta por Dueñas, Rojas, & Morales (2012) en su investigación.

3.1. Etapa 1. Ecuación de búsqueda.

A partir de la lectura de los artículos más citados en Scopus® sobre refrigeración con CO₂, se determinaron las palabras clave necesarias para hacer una búsqueda completa. Las palabras se dividieron en 3 categorías: 1. Refrigerante; 2. Sistema de aplicación; 3. Objetivo de las investigaciones. La búsqueda se realizó en inglés en la base de datos Scopus®.

3.2. Etapa 2. Base de datos.

Se desarrolló un formato en Excel donde se pudiera introducir de manera ordenada la información de cada artículo. Las columnas evaluadas fueron: Autores, Año de publicación, Título, Revista, DOI, Enfoque, Modificación al sistema y Refrigerante.

El enfoque de los artículos se determinó de acuerdo al tipo de investigación y cada artículo se podía clasificar hasta en 3 enfoques. Otro ítem analizado fue las modificaciones realizadas a los ciclos de refrigeración, con el objetivo de tener una visión más específica sobre los cambios que se hacen para mejorar el COP de estos sistemas. Finalmente, se revisó si había una comparación directa con el rendimiento del CO₂ respecto a uno o varios refrigerantes para tabularlo.

3.3. Etapa 3. Análisis de información.

esta etapa se dividió en 2 actividades; la primera fue un análisis bibliográfico con la herramienta *Sci-Val*; para la segunda, se descargó en formato .csv la información arrojada por la base de datos Scopus® y se utilizó como dato de partida en el software *VOSviewer* para hacer un análisis de co-ocurrencia de palabras clave, eliminando las palabras que no tenían relación con el estudio que se estaba realizando. Los tipos de análisis realizados fueron: 1. Análisis de información técnica; 2. Análisis del tipo de investigación.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Ecuación de búsqueda

En la tabla 1 se resume el patrón de búsqueda. Se buscaron todas las publicaciones que obedecieran a la ecuación de búsqueda: TITLE-ABS-KEY = CO₂ OR "Carbon dioxide" OR R744 AND "Refrigeration cycle" OR Freezing AND COP, arrojando como resultado una base de datos de 182 artículos.

Los términos que hacen referencia al refrigerante son 3, de los cuales 2 son el nombre común y el tercero es el nombre técnico. Por otro lado, el sistema de aplicación hizo referencia a la tecnología; "refrigeration cycle" se emplea para hablar técnicamente del ciclo de refrigeración (tuberías, sistemas de expansión, evaporación, compresión y otros accesorios auxiliares), mientras que "freezing" se empleó para incluir las investigaciones aplicadas a congelación. Finalmente, al ser una vigilancia tecnológica, donde el objetivo es analizar el grado de madurez de la tecnología de refrigeración en investigaciones científicas, el único objetivo que se tuvo en cuenta para la investigación fue el COP, el cual representa la eficiencia del sistema y se obtiene al evaluar la capacidad de enfriamiento respecto al consumo de energía.

Tabla 1. Patrón de búsqueda.

AND			
OR	CO ₂	Refrigeration cycle	COP
	Carbon dioxide		
	R744	Freezing	

4.2. Base de datos

De los 182 artículos se analizaron los publicados entre el 2016 y el 2020, teniendo como resultado el análisis de 80 artículos. Este filtro se decidió porque la investigación se centra en las tendencias de la tecnología y se busca la información con los desarrollos y resultados más recientes. En la tabla 2 se muestra la descripción de cada uno de los enfoques identificados en las publicaciones.

Tabla 2. Descripción de los enfoques de los artículos.

ENFOQUE	DESCRIPCIÓN
Análisis económico	Evaluación del gasto económico que representan las pérdidas energéticas y el funcionamiento del sistema
Modificación al sistema	Agregar o sustituir componentes en el ciclo de refrigeración para evaluar su rendimiento
Cogeneración	Acople de un sistema adicional para aprovechar las pérdidas de calor y generar energía
Comparación de ciclos	Evaluación de la eficiencia de ciclos con diferentes modificaciones
Comparación de refrigerantes	Evaluación de refrigerantes operando en ciclos con las mismas exigencias para comparar su rendimiento
Análisis ambiental	Evaluación del impacto ambiental que genera el sistema de refrigeración
Transporte	Aplicación del ciclo con CO ₂ en operaciones de transporte
Análisis de sensibilidad	Estudio del impacto de los cambios en las condiciones de funcionamiento del sistema
Banco de pruebas	Ciclo de refrigeración a escala para hacer estudios específicos en él
Sistema en cascada	Adaptación de 2 ciclos de refrigeración en serie
Revisión	Estudio donde se verifican las publicaciones de un tema determinado y se hace un resumen comparativo
Mezcla de refrigerantes	Crear mezclas de refrigerantes, incluyendo el CO ₂ , para mejorar el rendimiento del ciclo
Modelo matemático	Desarrollo de un modelo matemático para representar el sistema y predecir sus variaciones

En la figura 1 se puede apreciar gráficamente la cantidad de artículos publicados para cada uno de los enfoques, cabe resaltar que los artículos pueden tener más de un enfoque. El análisis termodinámico es necesario cuando se desea evaluar el COP de una instalación de refrigeración, por lo que este enfoque no se tuvo en cuenta para el conteo; por otro lado, hay una gran cantidad de artículos enfocados en modificaciones al sistema, ya que es la alternativa que permite agregar componentes o cambiarlos para obtener un mayor rendimiento en el funcionamiento global. Es importante mencionar que la cogeneración es la tendencia en este tipo de ciclos y permite aumentar significativamente el coeficiente de rendimiento global del sistema de refrigeración, además de ofrecer energía eléctrica o agua caliente, importante en industrias de alimentos para procesos de producción, limpieza, desinfección y desescarche de zonas de refrigeración. Finalmente, la comparación de ciclos es un enfoque atractivo porque sirve como

justificación para investigaciones donde se busca reemplazar refrigerantes del tipo HCFC, HFC o hacer comparaciones con los HC y otros refrigerantes naturales.

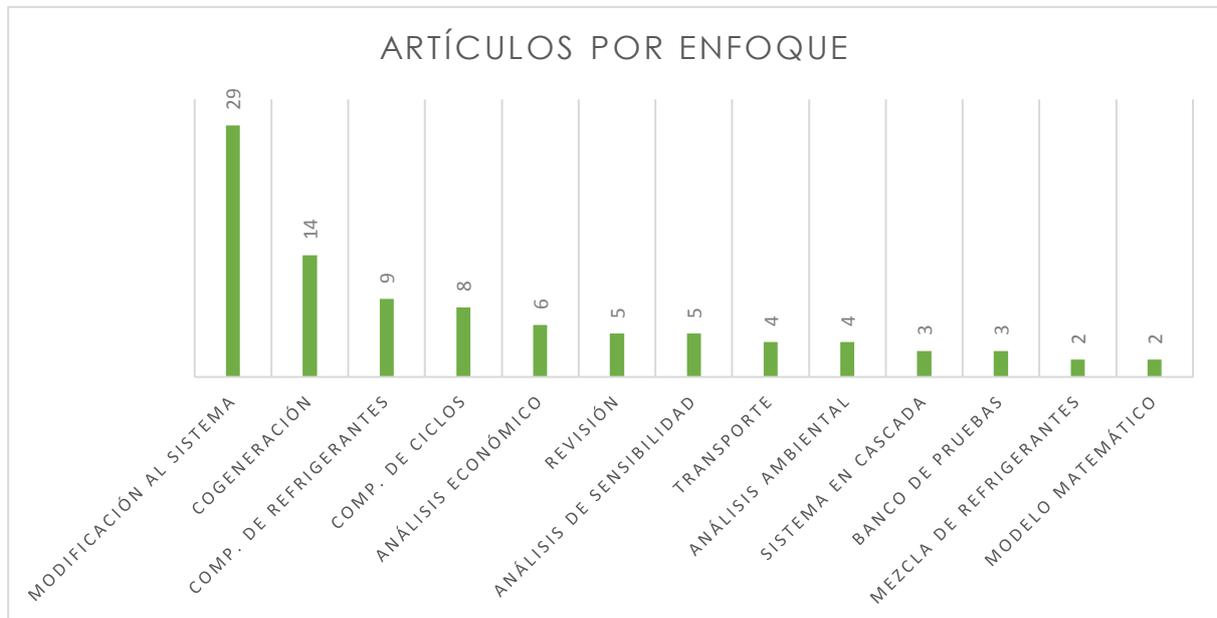


Figura 1. Cantidad de artículos para cada enfoque.

Por otra parte, los artículos clasificados como “Revisión” son fuentes de información muy completas, ya que son herramientas donde se condensa y compara una gran cantidad de resultados de diversos autores, ofreciendo importantes análisis al momento de desarrollar un proyecto de este tipo.

El resumen de las modificaciones al sistema se presenta en la figura 2. La descripción de cada una de estas se toma del artículo tipo review realizado por (Bruno, Belusko, & Halawa, 2019), apoyado en algunos conceptos de (Liu, y otros, 2017) y (Liu, Sun, & Wang, 2019)

-Eyector: utiliza la transferencia de momentum entre el fluido motor (es el que viaja a mayor presión) y el fluido de succión para aumentar la presión de succión del compresor, lo que a su vez reduce la demanda de potencia del compresor.

-Compresión Booster: un sistema *Booster* puede constar de dos o más secciones de presión (temperatura) servidas por dos o más compresores. En la mayoría de veces se utiliza en aplicaciones de baja y media temperatura. El compresor de temperatura media eleva la presión del gas CO₂ antes de que ingrese al condensador/gas cooler.

-IHX: el intercambiador de calor interno es un intercambiador de calor introducido para utilizar el calor disponible de la salida del gas cooler CO₂ para

recalentar el gas en la línea de succión del compresor. El IHX aumenta el subenfriamiento en la entrada del dispositivo de expansión y disminuye la cantidad de producción de flash gas.

-Subenfriamiento: se divide en mecánico y termoeléctrico. Con esta modificación se suaviza la caída en la capacidad y el COP del ciclo transcrito cuando se trabaja a presiones por debajo de la presión óptima del gas cooler.

-Tubo vórtice: el objetivo de usar este dispositivo es reducir las pérdidas por estrangulamiento. El uso del tubo vórtice como dispositivo de expansión es una de las modificaciones del ciclo prometedoras para mejorar el COP del ciclo transcrito del CO₂.

-Expansor: El estrangulamiento es un proceso irreversible que impone una doble penalización, es decir, disminución del efecto de refrigeración y aumento de la entrada de trabajo a la compresión. El expansor minimiza la pérdida por estrangulamiento que sufre un sistema de CO₂ transcrito y recupera esta pérdida para la generación de energía mecánica.

-Compresión paralela: el gas que sale del gas cooler se expande y entra al separador. La porción líquida se expande aún más antes de ingresar al evaporador. La porción de gas que sale del separador ingresa al primer compresor y se encuentra con el gas que sale del segundo compresor antes de ingresar al gas cooler. Esta modificación aumenta la eficiencia del ciclo en climas cálidos y moderados.

-EXV: la válvula de expansión electrónica se beneficia de su respuesta rápida, amplio rango de trabajo, control preciso y se ha utilizado ampliamente en bombas de calor de CO₂ y sistemas de aire acondicionado. A diferencia de otros refrigerantes, en la entrada de la válvula, el CO₂ se mantiene en estado supercrítico.

El uso de eyectores como reemplazo al mecanismo de expansión es la modificación más común para el ciclo de refrigeración con CO₂. Esto puede atribuirse a la versatilidad que ofrece y al aprovechamiento del momentum que lleva el refrigerante a alta presión antes de la expansión para succionar el que llega a baja presión al compresor, reduciendo la cantidad de energía requerida por este último. De acuerdo a (Dilshad, Kalair, & Khan, 2019), el eyector puede aumentar la eficiencia energética del ciclo hasta un 36%, el subenfriamiento hasta un 30%, el tubo vórtice ha mostrado ahorros cercanos al 37% y la compresión paralela ronda el 47%. El incremento de esta eficiencia energética viene acompañado con mayores inversiones al momento de

instalar el sistema de refrigeración, requerimientos más estrictos para programas de mantenimiento, mayor demanda de espacio en el sitio de instalación y un alto grado de ingeniería para el cálculo del sistema y la mejor adaptación de acuerdo a las condiciones ambientales y requerimientos industriales para obtener el mayor beneficio eficiencia/costo.

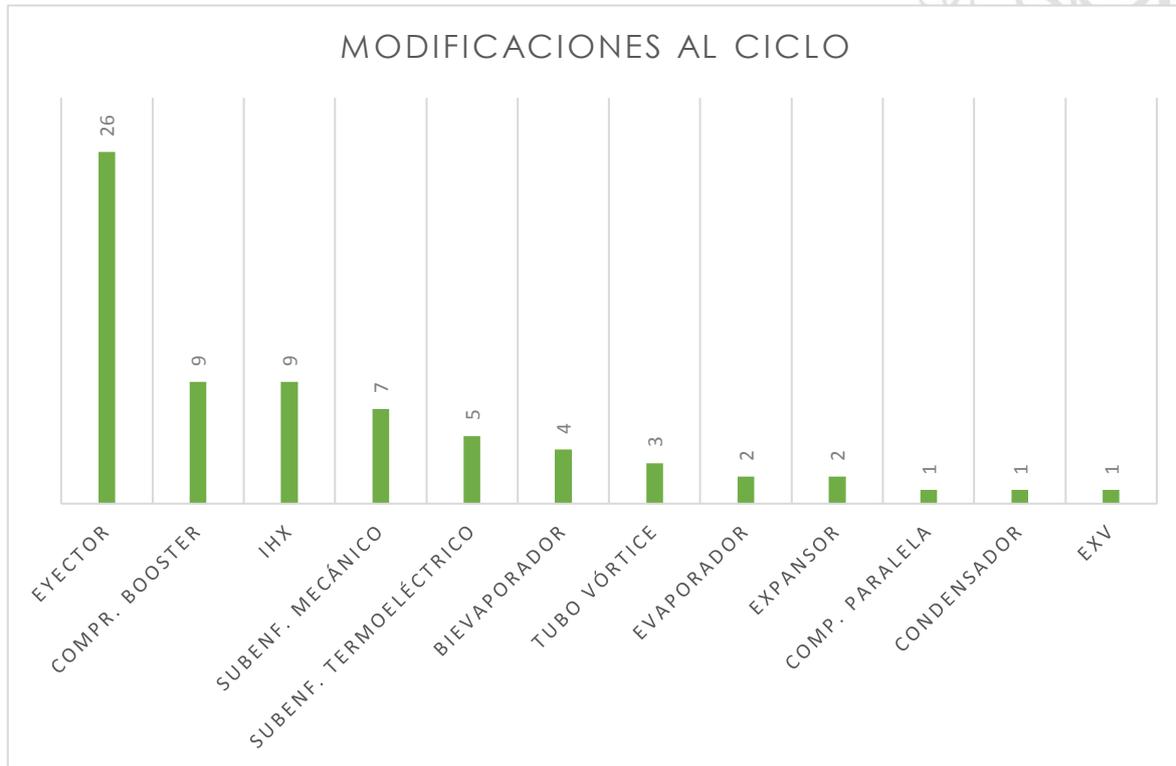


Figura 2. Modificaciones de los componentes del ciclo con CO₂.

Debido a la presión de las normas del cuidado del medio ambiente, el CO₂ está tomando gran importancia para el reemplazo de los refrigerantes de alto impacto de calentamiento global y alto agotamiento al ozono, por lo que se encuentran varios artículos donde se compara su rendimiento respecto a otros refrigerantes de reemplazo. En la tabla 3 se muestra la cantidad de comparaciones con cada uno de los refrigerantes y su respectivo PAO y PCG.

Comparando el CO₂ con los demás refrigerantes naturales, la investigación del R744A para refrigeración está tomando fuerza por su alto potencial y similitudes con el CO₂, a pesar de tener un alto PCG y ser una aplicación que apenas se está empezando a desarrollar. El amoníaco (R717) se ve como una de las alternativas más amigables con el medio ambiente y el ozono, pero su aplicación se ve afectada por los peligros que representa en términos de seguridad; no es compatible con el cobre, zinc y aleaciones de cobre, aumentando el costo del montaje; su escasa miscibilidad requiere un mecanismo separado para el retorno del aceite al compresor y demanda un mayor espacio para su montaje en comparación con el CO₂. El etano (R170)

y el propano (R290) se reportaron como refrigerantes que se encuentran en desarrollo, por lo que su aplicación en modelos industriales está aun limitada y se encuentran únicamente en aplicaciones domésticas. (Abas, y otros, 2018) Los demás refrigerantes que se muestran en la tabla 3 son de alto impacto ambiental y el objetivo de las investigaciones es encontrar el mejor reemplazo para ellos.

Tabla 3. Refrigerantes con los que se compara el rendimiento del CO₂ con su respectivo PAO y PCG. Tomado y adaptado de (World Health Organization, 2014) y (Urrego Rodríguez, 2018).

Refrigerante	Fórmula molecular	Cantidad de comparaciones	PAO	PCG
R744A	N ₂ O	5	0	265
R170	CH ₃ CH ₃	3	0	3
R290	CH ₃ CH ₂ CH ₃	3	0	11
R404A	CHF ₂ CF ₃ (44%) + CH ₂ FCF ₃ (4%) + CH ₃ CF ₃ (52%)	2	0	3922
R143a	CH ₃ CF ₃	1	0	4800
R134a	CH ₂ FCF ₃	1	0	1430
R32	CH ₂ F ₂	1	0	704
R717	NH ₃	1	0	0
R22	CHClF ₂	1	0,05	1810

4.3. Análisis de información

Tomando como referencia la información suministrada por *Sci-Val*, se realizó el análisis bibliométrico de la base de datos de 182 artículos para entender de manera general el comportamiento de las publicaciones.

La dinámica de publicación de artículos se muestra en la figura 3, evidenciando que el estudio del ciclo de refrigeración con CO₂ ha tenido un crecimiento con tendencia exponencial. De acuerdo a la base de datos que se desarrolló, esta tendencia puede atribuirse a la alta demanda que está teniendo el sistema de refrigeración con CO₂ y la necesidad de mejorar el rendimiento y optimizar las condiciones de operación.



Figura 3. Publicaciones por año sobre refrigeración con CO₂ entre 1998 y 2020.

La cantidad de publicaciones por país es un indicador importante porque muestra el impacto científico de las regiones en determinado tema. En la figura 4 se grafican los primeros 10 países a nivel mundial y los primeros 3 de Latinoamérica, demostrando que es una tecnología de alto interés académico en países asiáticos y, en general, en países desarrollados, que son los que tienen menos tiempo para hacer la migración completa de los refrigerantes; en contraste, la generación de conocimiento en Latinoamérica no presenta mayor importancia en este ámbito.

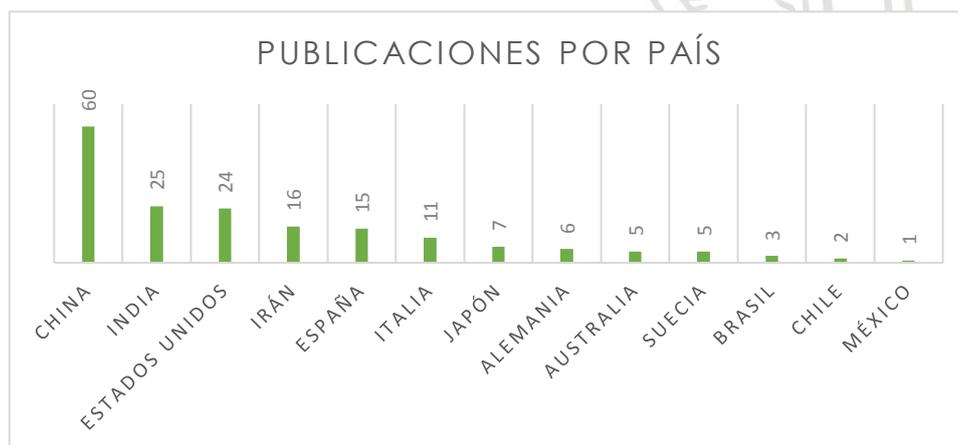


Figura 4. Cantidad de publicaciones por país.

Las publicaciones en Scopus® se clasifican de acuerdo al área de impacto de la investigación, por lo que en la figura 5 se muestra en un gráfico tipo torta la participación de las publicaciones en cada una de las áreas, teniendo la mayor participación en *Ingeniería y Energía*, resultado esperado porque el objetivo de las publicaciones es mejorar el rendimiento del ciclo de refrigeración. En *Otros* se encuentran *Ciencias de materiales*, *Ciencias*

computacionales, Matemáticas, entre otros, y son los que tienen participación individual menor al 4%.

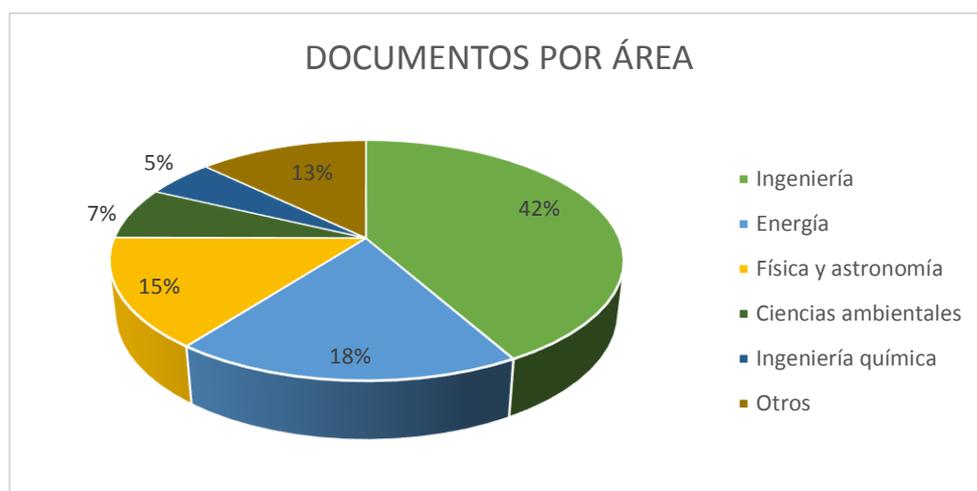


Figura 5. Participación de las publicaciones por área.

Varias publicaciones fueron patrocinadas por institutos, ministerios, comisiones y otras organizaciones interesadas en el desarrollo de esta tecnología, evidenciando que la *National Natural Science Foundation of China* es la organización con mayor cantidad de patrocinios. La tabla 4 muestra los 7 patrocinadores que mayor cantidad de artículos han auspiciado. Esto contrasta con la cantidad de publicaciones de investigadores de China, lo cual complementa la información mostrada en la figura 4. El patrocinio de las investigaciones es una alternativa válida para generar impacto en diferentes áreas del conocimiento y promover el reconocimiento de los países, brindando herramientas para el avance tecnológico.

Tabla 4. Cantidad de artículos patrocinados.

Patrocinador	Artículos
National Natural Science Foundation of China	20
Department of Science and Technology, Ministry of Science and Technology, India	3
European Comission	3
European Regional Development Fund	3
Ministry of Education of the People's Republic of China	3
Energimyndigheten	2
Japan Society of the Promotion of Science	2

A partir de la base de datos de las 182 publicaciones, obtenida de Scopus®, se realizó un análisis de co-ocurrencia de palabras clave, además de su clasificación por año de publicación promedio para identificar la tendencia de las investigaciones en la línea de tiempo. La figura 6 muestra la conexión entre palabras clave y cómo se han usado en promedio en las publicaciones a lo largo del tiempo, únicamente en términos técnicos para conocer las opciones que aumentan el rendimiento del ciclo. Se evidencia que desde antes del 2012 se habla de ciclos transcíticos de CO₂, siendo el término más usado y del que parten la mayoría de co-ocurrencias. La tendencia actual se enmarca en el mejoramiento del rendimiento mediante métodos de recuperación de calor (cogeneración) y subenfriamiento del refrigerante a la salida del condensador.

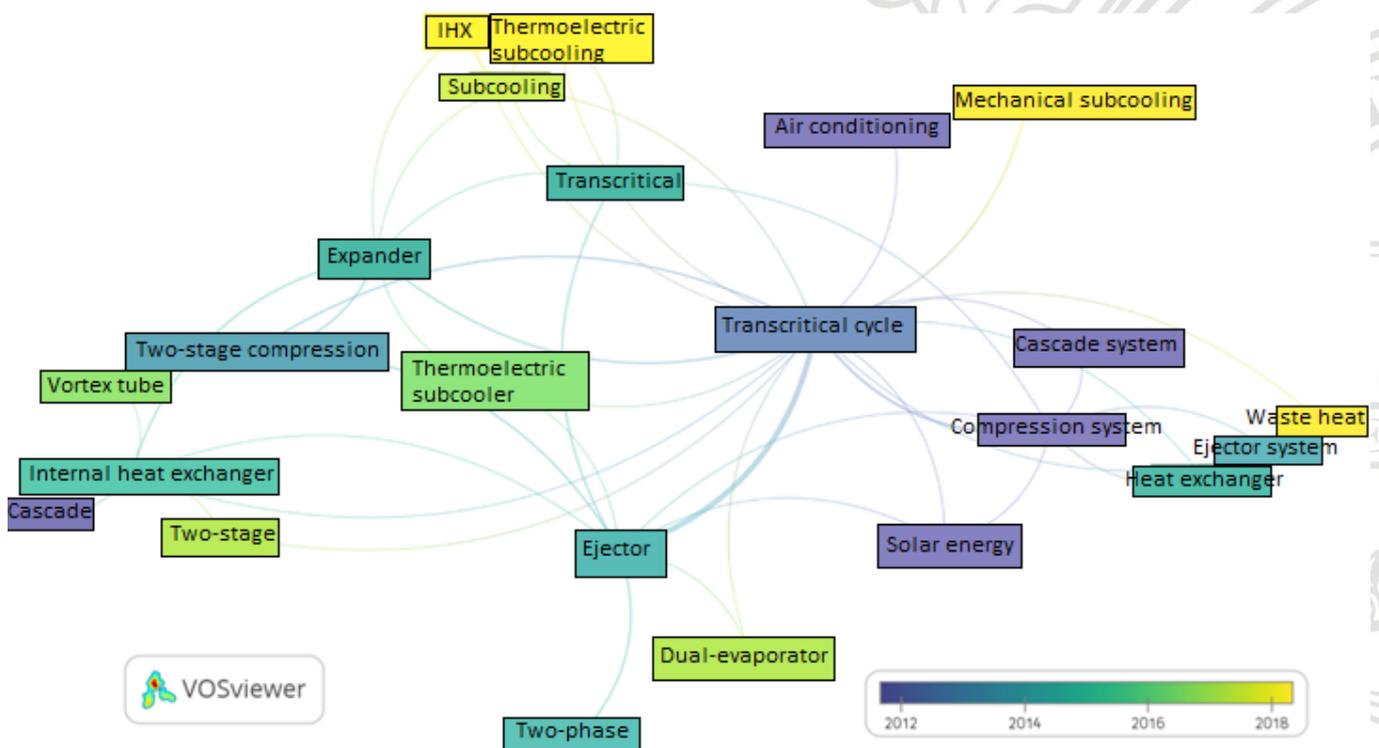


Figura 6. Mapa de palabras. Desarrollo técnico. Elaborado con el software VOSviewer.

Adicionalmente, se hizo el análisis de co-ocurrencia de palabras clave (figura 7) para revisar el enfoque de las publicaciones y su evolución a lo largo del tiempo, demostrando que el enfoque promedio actual se centra en análisis económicos, termodinámicos y en el cálculo de la destrucción de energía asociada al funcionamiento. Los estudios anteriores al 2010 muestran metodologías de estudio del ciclo, lo que sugiere que el uso de CO₂ como refrigerante ya es bien conocido y el objetivo actual es mejorar la eficiencia energética adaptando el sistema a diferentes aplicaciones y condiciones. Esto comprueba los resultados obtenidos en el análisis realizado a los artículos publicados entre 2016 y 2020, presentado en la etapa 2.

Los análisis de co-ocurrencia presentados muestran interesantes conexiones entre palabras clave. De acuerdo a la figura 6, el ciclo transcrito de CO₂ es el más estudiado y esto se debe a las ventajas que ofrece, además es un ciclo en el que el refrigerante puede trabajar bajo condiciones subcríticas y transcriticals, modificando la presión de operación y aprovechando las propiedades del fluido. Antes del 2014, la mayoría de publicaciones buscaban modificaciones al ciclo y evaluaban diferentes dispositivos para introducirlos en este; a medida que avanzaron las investigaciones técnicas, surgió la necesidad de estudiar a fondo la termodinámica del ciclo. Lo anterior se corrobora con la figura 7, donde se evidencia que antes del 2013 se recurría a modelamiento, simulación y experimentación, para después de esta fecha enfocar las publicaciones a la evaluación de parámetros de rendimiento.

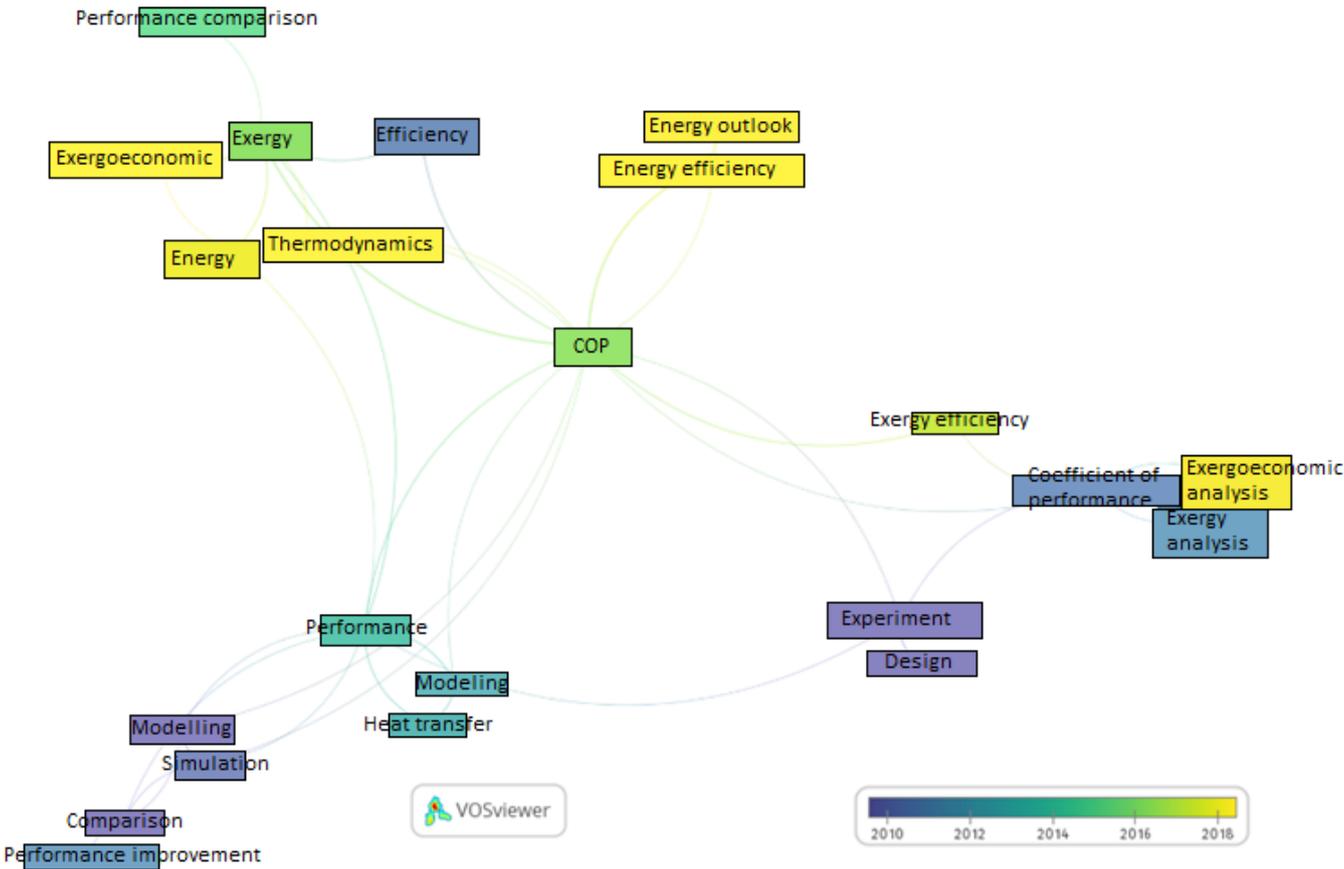


Figura 7. Mapa de palabras. Enfoque de las publicaciones. Elaborado con el software VOSviewer.

5. CONCLUSIONES

La ecuación de búsqueda arrojó una base de datos con 182 artículos que permitió determinar la tendencia de las investigaciones, demostrando que los trabajos se están enfocando en el aprovechamiento del calor generado por el sistema en los intercambiadores de calor intermedios y el condensador para suministrar agua caliente al proceso o integrar circuitos de calefacción de aire. También se verificó que las publicaciones han evolucionado desde los diseños de los sistemas de refrigeración hacia la búsqueda del aumento en el rendimiento del ciclo y la posibilidad de implementar este circuito o reemplazar los existentes.

Desde 2016 los investigadores vienen trabajando ampliamente en modificar el ciclo de refrigeración, añadir circuitos de cogeneración o subenfriamiento, comparar el ciclo de CO₂ con los tradicionales para las mismas aplicaciones y condiciones, además de evaluar ambiental y económicamente el desempeño del ciclo para aportar en la adaptación de esta tecnología, con el objetivo de aplicarla en instalaciones nuevas y migrar las existentes con alto agotamiento al ozono y efecto invernadero para reducir el impacto global que tiene la industria de alimentos refrigerados en el ambiente y la economía.

El CO₂ como refrigerante ha tenido gran acogida en el mercado retail e industrial ya que ofrece ventajas medioambientales, técnicas y de eficiencia energética que lo hacen muy atractivo para el reemplazo de refrigerantes sintéticos de alto impacto a la capa de ozono y efecto invernadero.

A la empresa Comestibles DAN S.A. se le hizo entrega del informe científico de tipo analítico donde se mostró toda la información contenida en el presente reporte, además de una evaluación del diseño del sistema de refrigeración que se proyecta instalar respecto al grado de madurez de la tecnología, basado en las investigaciones publicadas desde el 2016 hasta el 2020 para la refrigeración con CO₂, cumpliendo así con uno de los objetivos específicos del proyecto macro N.º 84480, inscrito en la convocatoria N.º 940 de 2021 del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación para el acceso a beneficios tributarios por Inversión.

REFERENCIAS

- Abas, N., Kalair, A., Khan, N., Haider, A., Saleem, Z., & Saleem, M. (2018). Natural and synthetic refrigerants, global warming: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(90), 557-569.
- Bolaji, B., & Huan, Z. (2013). Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(18), 49-54. doi:10.1016/j.rser.2012.10.008
- Bruno, F., Belusko, M., & Halawa, E. (2019). CO2 Refrigeration and Heat Pump Systems - A Comprehensive Review. *Energies*. doi:10.3390/en12152959
- Dilshad, S., Kalair, A. R., & Khan, N. (2019). Review of carbon dioxide (CO2) based heating and cooling technologies: Past, present, and future outlook. *Energy Research*, 1-56. doi:10.1002/er.5024
- Doerffel, C., Thomas, C., & Hesse, U. (2020). Experimental results of various efficiency enhancing measures for CO2 refrigeration systems. *14th IIR Gustav-Lorentzen Conference on Natural Fluids, GL 2020* (págs. 476 - 481). Virtual, Kyoto; Japan: Refrigeration Science and Technology.
- Dueñas, M., Rojas, D., & Morales, M. E. (2012). Propuesta metodológica para realizar mapas de conocimiento. *Revista facultad de ciencias económicas volumen XX*, 77 - 90.
- Liu, C., Zhang, J., Gui, Y., Li, W., Shi, J., Chen, J., . . . Kang, Z. (2017). Mass flow characteristics and empirical modeling of R744 flow through electronic expansion device. *International Journal of Refrigeration*, 82-88. doi:10.1016/j.ijrefrig.2017.11.025
- Liu, Y., Sun, Y., & Wang, D. (2019). Research on carbon dioxide transcritical refrigeration cycle with vortex tube. *3rd International Workshop on Renewable Energy and Development*. doi:10.1088/1755-1315/267/2/022010
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2021). *Programa de Oferta Institucional*. Obtenido de <https://minciencias.gov.co/convocatorias/innovacion-y-productividad/convocatoria-para-el-registro-propuestas-que-accederan-0>
- Programa ERICA. (2012). *Guía Metodológica de Práctica de la Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva*. Valencia, España - Medellín, Colombia: España y sus regiones intercambian conocimiento con Antioquia. Recuperado el 16 de 03 de 2021

UN Environment Programme. (2019). *Hoja informativa núm. 1 sobre la Enmienda de Kigali*. Francia: Acción por el Ozono. Recuperado el 16 de 03 de 2021, de https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26869/7876FS01Intro_SP.pdf?sequence=3&isAllowed=y#:~:text=En%20virtud%20de%20la%20Enmienda,de%20hasta%20medio%20grado%20cent%C3%ADgrado.

Unidad Técnica Ozono. (2017). *Colombia, líder en la región en la preservación de la capa de ozono*. Bogotá: Boletín No. 43. OZONO. Recuperado el 17 de 03 de 2021, de https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Boletines_de_Ozono/BOLETIN_OZONO_SEPTIEMBRE_N43_.pdf

Unidad Técnica Ozono. (2020). *logros de la implementación del Protocolo de Montreal y retos frente a la implementación de la Enmienda de Kigali*. Bogotá: Boletín No. 48. OZONO. Recuperado el 16 de 03 de 2021, de https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Boletines_de_Ozono/boletin48_print_1.pdf

Urrego Rodríguez, C. (2018). Metodología de selección de refrigerantes alternativos ecológicos y eficientes energéticamente. *Revista de Investigación. Fundación Universidad de América.*, 75-89. Obtenido de <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/download/180/178/>

World Health Organization. (2014). *Environmental management of refrigerant gases and refrigeration equipment*. Cambridge: World Health Organization. Obtenido de https://www.who.int/medicines/areas/quality_safety/quality_assurance/TS-environmental-mgt-final-sign-off-a.pdf