

UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS  
DE DESTRUCCIÓN DE SUSTANCIAS  
AGOTADORAS DE LA CAPA DE OZONO-SAO  
Y ANÁLISIS DE SU APLICACIÓN EN  
COLOMBIA**

**Angélica Nataly Antolínez Esquivel**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Bogotá D.C., Colombia  
2021

# **ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE DESTRUCCIÓN DE SUSTANCIAS AGOTADORAS DE LA CAPA DE OZONO-SAO Y ANÁLISIS DE SU APLICACIÓN EN COLOMBIA**

**Angélica Nataly Antolínez Esquivel**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Maestría en Ingeniería Ambiental - Profundización

Director

Ing. Msc. Oscar Javier Suárez Medina

Línea de Investigación:

Gestión de residuos peligrosos

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Bogotá D.C., Colombia  
2021

*A mi familia, mi apoyo incondicional.*

*“Lo mejor para las turbulencias del espíritu, es aprender. Es lo único que jamás se malogra. Puedes envejecer y temblar, anatómicamente hablando; puedes velar en las noches escuchando el desorden de tus venas, puede que te falte tu único amor y puedes perder tu dinero por causa de un monstruo; puedes ver el mundo que te rodea, devastado por locos peligrosos, o saber que tu honor es pisoteado en las cloacas de los espíritus más viles. Sólo se puede hacer una cosa en tales condiciones: aprender”.*

*Marguerite Yourcenar*

# Agradecimientos

A los docentes del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia por sus enseñanzas y apoyo en el curso de la maestría.

Al ingeniero Oscar Javier Suárez Medina, por su orientación y apoyo permanentes durante el curso de la maestría y en particular durante la elaboración de este trabajo.

A la Unidad Técnica Ozono del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, por la maravillosa experiencia de trabajar por la protección de nuestro ambiente durante todos estos años y por facilitar la información sobre los proyectos implementados en el país para el cumplimiento del Protocolo de Montreal.

A los conocidos del sector ambiental y el sector de refrigeración y acondicionamiento del aire, por sus valiosos aportes de información y orientación.

A mi familia por creer siempre en mí, acompañarme y apoyar todos mis proyectos.

A Esteban, por su compañía, sus consejos y su paciencia, pero sobre todo por hacer parte de mi vida.

A mis amigos, que no me dejaron desfallecer y siempre me alentaron a continuar y terminar este trabajo.

# Resumen

## **Estado del arte de las tecnologías de destrucción de sustancias agotadoras de la capa de ozono -SAO y análisis de su aplicación en Colombia**

Las sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO) son compuestos químicos antropogénicos, responsables del agotamiento de la capa de ozono. Los hidrofluorocarbonos (HFC), usados como sustitutos de las SAO, no afectan la capa de ozono, sin embargo, son considerados gases de efecto invernadero (GEI) con un alto potencial de calentamiento atmosférico (PCA).

Las SAO son controladas por el Protocolo de Montreal, mediante cronogramas para la eliminación gradual de su producción y consumo. Asimismo, de acuerdo con la enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, ratificada por Colombia en 2019, la producción y consumo de los HFC será controlada a partir de 2019 para los países desarrollados y a partir de 2024 para los países en desarrollo.

A pesar de las medidas de control, existen bancos de SAO y HFC, instalados principalmente en equipos de refrigeración y acondicionamiento del aire, que pueden ser liberados a la atmósfera, si no se toman medidas para su recuperación y posterior reutilización (previo tratamiento) o destrucción.

Colombia cuenta con infraestructura para la gestión de los bancos de SAO y HFC, que incluye un horno rotatorio de alta temperatura, con capacidad para la destrucción de 25-50 t/año de SAO a partir del 2022. Sin embargo, se estima que para el año 2030 se requerirá contar con instalaciones adicionales con capacidad para destruir entre 100 y 215 t/año de estas sustancias, principalmente HFC.

El objetivo de este trabajo es establecer el estado del arte de las tecnologías de destrucción de las SAO, a nivel internacional, y analizar su aplicabilidad en Colombia. Considerando la reciente aprobación de la enmienda de Kigali, también se incluyó y analizó información concerniente a las tecnologías para la destrucción de los HFC.

El trabajo incluye la estimación de la cantidad de sustancias que estarán disponibles para destrucción en los próximos años en Colombia, mediante el análisis de los bancos de SAO y HFC, y una extensa revisión documental sobre la implementación de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC a nivel internacional y nacional. La información recopilada se usó para identificar algunas barreras para la implementación de estas tecnologías en Colombia; así como para la evaluación de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC en función de criterios técnicos, ambientales y económicos. Por último, se identificaron algunas posibilidades de investigación relacionadas con la destrucción de las SAO y HFC en el país.

De acuerdo con la revisión documental, las principales tecnologías usadas actualmente para la destrucción de SAO y HFC a nivel mundial son la incineración con otros residuos en hornos rotatorios de alta temperatura, la destrucción en hornos cementeros y la reacción con vapor sobrecalentado. Asimismo, la revisión sugiere que en países en desarrollo como Colombia el uso de tecnologías de plasma no es viable, debido a su alto costo, su alto consumo energético y la dificultad para conseguir los insumos requeridos para su funcionamiento.

Para evaluar las tecnologías para la destrucción de SAO y HFC se analizó el desempeño de cada tecnología en aspectos técnicos, ambientales y económicos, mediante el análisis multicriterio, aplicando una metodología híbrida AHP-PROMETHEE. Se consideraron tecnologías aprobadas por el Protocolo de Montreal para destrucción de fuentes concentradas de CFC y HCFC y recomendadas para aprobación o con un alto potencial para la destrucción de fuentes concentradas de HFC.

Los resultados de la evaluación indican que la tecnología con mejor desempeño técnico es el reactor de craqueo, mientras que la tecnología con mejor desempeño ambiental es el arco de plasma de argón y la tecnología con mejor desempeño económico es el horno cementero. El resultado de la evaluación integrada sugiere que la tecnología más recomendada para para la destrucción de SAO y HFC en el país es el reactor de vapor sobrecalentado. Cuando se les da los criterios ambientales tienen mayor peso que los criterios económicos, las tecnologías de arco de plasma de nitrógeno y arco de plasma de argón se ubican en segundo y tercer lugar, respectivamente. Sin embargo, cuando los criterios económicos predominan sobre los criterios ambientales, las tecnologías de horno cementero e incineración en horno rotatorio se clasifican en segundo y tercer lugar, respectivamente.

***Palabras clave: Sustancias agotadoras de ozono (SAO), hidrofluorocarbonos (HFC), tecnologías de destrucción, análisis multicriterio, Proceso Analítico Jerárquico, PROMETHEE.***

# Abstract

## **State of the art of destruction technologies for ozone-depleting substances (ODS) and analysis of their applicability in Colombia**

Ozone-depleting substances (ODS) are anthropogenic chemical compounds responsible for the depletion of the ozone layer. Hydrofluorocarbons (HFCs), used as substitutes for ODS, do not affect the ozone layer, however, they are considered greenhouse gases (GHGs) with a high global warming potential (GWP).

ODS are controlled by the Montreal Protocol through phase-out schedules for their production and consumption. Also, according to the Kigali amendment to the Montreal Protocol, ratified by Colombia in 2019, the production and consumption of HFCs will be controlled from 2019 for developed countries and 2024 for developing countries.

Despite control measures, there are banks of ODS and HFCs, mainly installed in refrigeration and air conditioning equipment, which can be released into the atmosphere if measures are not taken for their recovery and subsequent reuse (after treatment) or destruction.

Colombia has infrastructure for the environmental management of ODS and HFC banks, including a high-temperature rotary kiln with an ODS's destruction capacity of 25-50 t/year, which will start operation in 2022. However, it is estimated that by 2030 additional facilities, with a capacity to destroy 100 - 215 t/year (17 - 36 kg/h) of these substances, mainly HFCs will be required.

The objective of this work is to establish the state of the art of ODS destruction technologies at the international level, analyzing their applicability in Colombia. Considering the recent approval of the Kigali amendment, information concerning HFC destruction technologies was also included in this analysis.

The work includes the estimation of the quantity of substances that will be available for destruction in the coming years in Colombia, through the analysis of ODS and HFC banks; and an extensive desk review on the implementation of ODS and HFC destruction technologies at the international and national level. The information gathered was used to identify some barriers for the implementation of these technologies in Colombia; as well as for the evaluation of ODS and HFC destruction technologies based on technical, environmental, and economic criteria. Finally, some research possibilities related to ODS and HFC destruction in the country were identified.

According to the desk review, the main technologies currently used for ODS and HFC destruction worldwide are incineration with other wastes in high-temperature rotary kilns, destruction in cement kilns and superheated steam reactor. The review also suggests that in developing countries such as Colombia the use of plasma technologies is not feasible, due to their high cost, high energy consumption and the difficulty in obtaining the inputs required for their operation.

To evaluate the technologies for the destruction of ODS and HFCs, the performance of each technology was analyzed in technical, environmental, and economic aspects through multi-criteria analysis, applying a hybrid AHP-PROMETHEE methodology. Selected technologies approved by the Montreal Protocol for destruction of concentrated sources of CFCs and HCFCs, and technologies recommended for approval or with a high potential for destruction of concentrated sources of HFCs were considered.

The results of the assessment indicate that the technology with the best technical performance is the cracker reactor, while the technology with the best environmental performance is the argon plasma arc and the technology with the best economic performance is the cement kiln. The result of the integrated assessment suggests that the most recommended technology for the destruction of ODS and HFCs in the country is the superheated steam reactor. When environmental criteria are weighted more than economic criteria, the nitrogen and argon plasma arc technologies rank second and third, respectively. However, when economic criteria predominate over environmental criteria, the cement kiln and rotary kiln incineration technologies are ranked second and third, respectively.

***Keywords: Ozone-depleting substances (ODS), hydrofluorocarbons (HFCs), destruction technologies, multi-criteria analysis, Analytic Hierarchy Process (AHP), PROMETHEE.***

# Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
1. ANTECEDENTES .....	4
1.1. Sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO) e Hidroclorofluorocarbonos (HFC).....	4
1.2. Impacto ambiental de las SAO y los HFC.....	4
1.2.1. Agotamiento de la capa de ozono.....	4
1.2.2. Calentamiento global.....	5
1.2.3. Indicadores de impacto ambiental para las SAO y HFC .....	7
1.3. Protocolo de Montreal .....	8
1.3.1. Implementación del Protocolo de Montreal en Colombia .....	9
1.3.2. Consumo de SAO y HFC en Colombia.....	10
1.4. Gestión ambiental de residuos de SAO y HFC en Colombia.....	12
1.4.1. Generalidades de los residuos peligrosos .....	12
1.4.2. Principio de jerarquía para la gestión de residuos peligrosos .....	12
1.4.3. Importación y exportación de residuos de SAO .....	14
1.4.4. Red de recuperación, reciclaje y regeneración de refrigerantes .....	14
1.4.5. Posconsumo de neveras y equipos de acondicionamiento de aire .....	15
2. BANCOS DE SAO Y HFC .....	16
2.1. Generalidades de los bancos de SAO.....	16
2.2. Metodologías para el cálculo de bancos de SAO y HFC .....	17
2.2.1. Enfoque en equipos (Bottom-up) .....	17
2.2.2. Enfoque de sustancias (Top-down) .....	18
2.3. Bancos de SAO y HFC a nivel mundial.....	20
2.4. Bancos de SAO y HFC en Colombia.....	23
2.4.1. Bancos de SAO y HFC en Colombia (Enfoque de sustancias) .....	23

2.4.2.	Bancos de SAO y HFC en Colombia (Enfoque de equipos).....	24
3.	ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE DESTRUCCIÓN DE LAS SAO Y HFC .....	29
3.1.	Criterios de referencia para la evaluación y selección de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC .....	29
3.1.1.	Eficiencia de destrucción y remoción (DRE) .....	30
3.1.2.	Emisiones de dioxinas y furanos.....	30
3.1.3.	Emisiones de gases ácidos, material particulado y monóxido de carbono.....	31
3.1.4.	Capacidad técnica .....	31
3.2.	Tecnologías aprobadas por el Protocolo de Montreal para la destrucción de SAO y HFC .....	32
3.2.1.	Tecnologías de incineración .....	34
3.2.2.	Tecnologías de arco de plasma.....	38
3.2.3.	Tecnologías de conversión .....	41
3.3.	Otras tecnologías de destrucción de SAO y HFC.....	43
3.3.1.	Tecnologías de incineración .....	43
3.3.2.	Tecnologías de plasma.....	44
3.3.3.	Tecnologías de conversión .....	44
3.4.	Tecnologías de destrucción de PCB .....	45
3.5.	Destrucción de SAO y HFC a nivel mundial .....	46
3.5.1.	Instalaciones de destrucción de SAO y HFC a nivel mundial.....	46
3.5.2.	Costo de destrucción de SAO y HFC.....	47
3.6.	Destrucción de SAO en Colombia .....	48
3.6.1.	Necesidad de instalaciones de destrucción de SAO y HFC en Colombia.....	50
3.7.	Barreras para la implementación de tecnologías de destrucción de SAO y HFC en Colombia.....	51

4.	EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE DESTRUCCIÓN DE SAO Y HFC .....	54
4.1.	Metodología para evaluación de las tecnologías .....	54
4.1.1.	Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	55
4.1.2.	PROMETHEE II.....	59
4.2.	Evaluación de tecnologías para destrucción de SAO y HFC .....	62
4.2.1.	Planteamiento del problema .....	63
4.2.2.	Criterios de evaluación .....	64
4.2.3.	Formulación del modelo de decisión multicriterio.....	64
4.2.4.	Escenario de evaluación 2: Variación del peso de los criterios .....	72
4.2.5.	Análisis de resultados.....	73
5.	IDENTIFICACIÓN DE OPORTUNIDADES DE INVESTIGACIÓN.....	75
6.	CONCLUSIONES.....	81
7.	RECOMENDACIONES .....	85
	GLOSARIO .....	86
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
	Anexo A. Desempeño técnico y ambiental, y costos estimados para las tecnologías de destrucción de SAO y HFC .....	93
	Anexo B. Encuesta sobre tecnologías de destrucción de SAO y HFC.....	95

# LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1 PAO y PCA para las principales SAO y HFC usadas en Colombia .....	7
Tabla 1-2 Cronograma de eliminación del consumo de SCPM aplicable a Colombia .....	9
Tabla 1-3 Consumo de SCPM en Colombia (2019) .....	11
Tabla 2-1 Equipos que contienen SAO y HFC .....	17
Tabla 2-2 Factores para el cálculo de bancos de SAO y HFC para el sector RAC.....	19
Tabla 2-3 Factores para el cálculo de bancos de SAO y HFC para el sector espumas.....	20
Tabla 2-4 Bancos mundiales de SAO y HFC para 2002 y 2015 (BAU) - RAC y espumas.....	20
Tabla 2-5 Bancos mundiales de HCFC y HFC para 2002, 2015(BAU) y 2020(BAU) .....	21
Tabla 2-6. Bancos de CFC, HCFC y HFC para Colombia – Enfoque de sustancias (2015) .....	23
Tabla 2-7. Bancos de CFC, HCFC y HFC para el sector RAC en Colombia - Enfoque de equipos (2015) .....	24
Tabla 2-8. Proyección de bancos de CFC, HCFC y HFC para el sector RAC en Colombia BAU .....	26
Tabla 2-9. Proyección de bancos de CFC, HCFC y HFC para el sector RAC en Colombia aumentando la tasa de recuperación de equipos RAC .....	27
Tabla 3-1. Criterios de referencia de desempeño técnico para tecnologías de destrucción de SAO .....	30
Tabla 3-2. Tecnologías para la destrucción de SAO y HFCa aprobadas por el Protocolo de Montreal.....	33
Tabla 3-3. Ventajas y desventajas de las tecnologías de oxidación térmica (incineración) .....	37
Tabla 3-4. Ventajas y desventajas de las tecnologías de plasma .....	40
Tabla 3-5. Ventajas y desventajas de las tecnologías de conversión.....	43
Tabla 3-6. Tecnologías para la destrucción de PCB y desechos contaminados con PCB.....	45
Tabla 3-7. Plantas de destrucción de SAO a nivel comercial en el mundo.....	47
Tabla 3-8. Estándares de emisión de contaminantes para fuentes fijas en Colombia .....	50
Tabla 3-9. Barreras identificadas para la implementación de tecnologías de destrucción de SAO y HFC en Colombia.....	51
Tabla 4-1. Escala fundamental de comparación por pares - AHP .....	56
Tabla 4-2. Índice de consistencia aleatoria .....	58
Tabla 4-3. Principales tipos de funciones de preferencia - PROMETHEEII.....	61
Tabla 4-4. Tecnologías para la destrucción de SAO y HFC incluidas en la evaluación .....	63
Tabla 4-5. Criterios para evaluación de las tecnologías .....	64

Tabla 4-6. Matriz de comparación y vector de pesos para la evaluación integrada.....	65
Tabla 4-7. Matriz de comparación y vector de pesos para criterios técnicos.....	65
Tabla 4-8. Matriz de comparación y vector de pesos para criterios ambientales.....	65
Tabla 4-9. Matriz de comparación y vector de pesos para criterios económicos.....	66
Tabla 4-10. Valores de los criterios técnicos <sup>a</sup> .....	67
Tabla 4-11. Escala numérica para valoración de limitaciones técnicas.....	68
Tabla 4-12. Valoración de limitaciones técnicas para las alternativas evaluadas.....	68
Tabla 4-13. Flujos y clasificación para los criterios técnicos.....	68
Tabla 4-14. Valores de los criterios ambientales <sup>a</sup> .....	69
Tabla 4-15. Flujos y clasificación para los criterios ambientales.....	69
Tabla 4-16. Valoración de los criterios económicos <sup>a</sup> .....	70
Tabla 4-17. Escala numérica para valoración de la disponibilidad de la tecnología.....	70
Tabla 4-18. Escala numérica para valoración de la complejidad de la tecnología.....	71
Tabla 4-19. Flujos y clasificación para los criterios económicos.....	71
Tabla 4-20. Flujos netos y pesos relativos para la evaluación integrada.....	72
Tabla 4-21. Clasificación integrada de las alternativas de destrucción de SAO y HFC.....	72
Tabla 4-22. Matriz de comparación y vector de pesos – Escenario de evaluación 2.....	72
Tabla 4-23. Clasificación integrada de las alternativas de destrucción de SAO y HFC - Escenario de evaluación 2.....	73
Tabla 4-24. Clasificación final de las alternativas de destrucción de SAO y HFC – Escenario 1 .....	73
Tabla 4-25. Clasificación final de las alternativas de destrucción de SAO y HFC – Escenario 2 .....	74
Tabla 5-1. Universidades participantes en la encuesta sobre tecnologías de destrucción de SAO y HFC.....	75

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Emisiones antropógenas anuales totales de GEI por gases (1970 – 2010) .....	7
Figura 1-2 Beneficios climáticos de la Enmienda de Kigali .....	8
Figura 1-3 Consumo de SCPM en Colombia (1995 - 2019) .....	10
Figura 1-4 Consumo de CFC y HCFC a nivel mundial y en Colombia (toneladas PAO) .....	11
Figura 1-5 Consumo de SAO y HFC en Colombia por sectores usuarios (2018) .....	12
Figura 1-6 Principio de jerarquía para la gestión de residuos peligrosos.....	13
Figura 2-1 Esquema para la obtención de información para cálculo de inventarios de bancos de SAO y HFC – Énfoco de equipos .....	18
Figura 2-2 Bancos de SAO y HFC globales .....	21
Figura 2-3 Bancos de SAO en países A5 y no A5.....	22
Figura 2-4 Países A5 con los mayores bancos de SAO (2014).....	22
Figura 2-5. Bancos de CFC, HCFC y HFC para Colombia – Enfoque de sustancias (2015).....	24
Figura 2-6 Proyección de bancos de CFC, HCFC y HFC para el sector RAC en Colombia BAU .....	28
Figura 2-7 Proyección de bancos de CFC, HCFC y HFC aumentando la tasa de recuperación de equipos RAC .....	28
Figura 4-1. Ejemplo de estructura jerárquica AHP .....	55
Figura 5-1. Resultados pregunta No. 1 .....	76
Figura 5-2. Resultados pregunta No. 2 .....	76
Figura 5-3. Resultados pregunta No. 3 .....	77
Figura 5-4. Resultados pregunta No. 4 .....	77
Figura 5-5. Resultados pregunta No. 5 .....	78
Figura 5-6. Resultados pregunta No. 6 .....	78
Figura 5-7. Resultados pregunta No. 7 .....	79
Figura 5-8. Resultados pregunta No. 8 .....	80

# Lista de abreviaturas

AHP	Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process)
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CFC	Clorofluorocarbonos
COP	Contaminantes orgánicos persistentes
PCB	Policlorobifenilos.
PCDD	Dibenzoparadioxinas policloradas.
PCDF	Dibenzofuranos policlorados.
FML	Fondo Multilateral para la implementación del Protocolo de Montreal
GEI	Gas de efecto invernadero
HCFC	Hidroclorofluorocarbonos
HFC	Hidrofluorocarbonos
ITEQ	Factor de equivalencia tóxica
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)
MCDA	Método de análisis de decisiones con criterios múltiples (Multi-Criteria Decision Analysis)
PAO	Potencial de agotamiento de la capa de ozono (Ozono Depletion Potentia ODP)
PCA	Potencial de calentamiento atmosférico (Global Warming Potential - GWP)
PFC	Perfluorocarbonos
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (United Nations Environment Program - UNEP)
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations
RAC	Refrigeración y acondicionamiento del aire
RAEE	Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
SAO	Sustancia agotadora de la capa de ozono
SCPM	Sustancias Controladas por el Protocolo de Montreal
TEAP	Grupo de Evaluación Tecnológica y Económica del Protocolo de Montreal (Technology and Economic Assessment Panel)
UTO	Unidad Técnica Ozono

# INTRODUCCIÓN

Las sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO) son compuestos químicos antropogénicos, que contienen bromo y cloro, y tienen una vida atmosférica lo suficientemente larga como para ser transportados a la estratosfera, donde reaccionan con el ozono estratosférico, causando el fenómeno conocido como agujero de la capa de ozono, por lo que son controladas por el Protocolo de Montreal. Las SAO más reconocidas son los halones, los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), usadas principalmente como refrigerantes, agentes extintores de incendios, disolventes para la limpieza de equipos electrónicos y agentes espumantes.

Los hidrofluorocarbonos (HFC) son sustancias usadas como sustitutos de las SAO, que no afectan la capa de ozono, debido a que no contienen cloro. Sin embargo, los CFC, HCFC, y HFC son considerados gases de efecto invernadero (GEI) con un alto potencial de calentamiento atmosférico (PCA).

El Protocolo de Montreal, tratado internacional para la protección de la capa de ozono, ratificado universalmente, ha definido cronogramas para la eliminación gradual de la producción y consumo de las SAO, entre ellas los CFC y HCFC. Asimismo, en 2016 se aprobó la enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, ratificada por Colombia en 2019, con el propósito de reducir a partir de 2019 el consumo y la producción de hidrofluorocarbonos (HFC).

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos internacionales, existen bancos de SAO y bancos de HFC instalados principalmente en equipos de refrigeración y acondicionamiento del aire, equipos de extinción de incendios y espumas de poliuretano. Si no se toman medidas para su tratamiento o disposición, estas sustancias se liberarán a la atmósfera durante las próximas décadas contribuyendo al deterioro de la capa de ozono y al aumento del calentamiento global.

Para evitar emisiones a la atmósfera, es fundamental que las SAO y los HFC almacenadas en estos bancos se recuperen adecuadamente y sean tratadas para su reutilización o finalmente destruidas. Desde una perspectiva ambiental, la destrucción de las SAO y HFC no deseadas serán esenciales para evitar su liberación a la atmósfera. Sin embargo, la destrucción adecuada de estas sustancias enfrenta barreras informativas, económicas, logísticas y legales, especialmente en los países en desarrollo (ICF, 2008). Adicionalmente, los residuos de SAO se clasifican como residuos peligrosos y se encuentran incluidas en el Convenio de Basilea, por lo que un país que haya ratificado este Convenio y no tenga suficiente capacidad de destrucción requiere cumplir con los requisitos establecidos en el Convenio para la exportación de residuos de SAO (GIZ, 2015).

Colombia, como país parte del Protocolo de Montreal, ha cumplido con los compromisos de eliminación total del consumo de CFC, halones, tetracloruro de carbono, metil cloroformo y bromuro de metilo, a partir del 1 de enero de 2010. Actualmente, el país trabaja en la eliminación del consumo del grupo de los HCFC, que deberán cumplir con la meta de eliminación del 97,5% del consumo para el año 2030.

Asimismo, como parte de la implementación del Protocolo de Montreal, Colombia ha generado capacidad nacional para la gestión integral de los residuos de SAO. Actualmente, el país cuenta con 18 centros de acopio y 6 centros de regeneración de refrigerantes, en los cuales se puede realizar la regeneración de los refrigerantes HCFC-22, HFC-134a y las principales mezclas de HFC. Por otra parte, los halones recuperados de sistemas de extinción de incendios pueden ser usados para la recarga de extintores para el sector de aviación civil y militar, y no se recomienda su destrucción.

Adicionalmente, en los últimos años, se realizó la adecuación de un horno rotatorio de alta temperatura, ubicado cerca a Bogotá y con capacidad para la destrucción de 25-50 t/año de SAO (CFC y HCFC, como fuentes concentradas y diluidas). Este horno aún no se encuentra en funcionamiento, se espera que entre en servicio en el 2022.

Sin embargo, de acuerdo con el análisis de los bancos de SAO y HFC, se estima que para el año 2030 se requerirá contar con instalaciones adicionales con capacidad para destruir entre 100 y 215 t/año (17 a 36 kg/h) de estas sustancias, principalmente HFC. Bajo este panorama es necesario analizar cuáles son las opciones tecnológicas que podrían ser implementadas en Colombia para la destrucción de SAO y HFC en el país.

El presente trabajo tiene como objetivo describir el estado del arte de las tecnologías de destrucción de las SAO, a nivel internacional, y analizar su aplicabilidad en Colombia. Considerando la reciente aprobación de la enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal en el 2016 y su ratificación en Colombia en 2019, también se incluyó y analizó información relacionada con las tecnologías para la destrucción de los HFC.

El trabajo incluye la estimación de la cantidad de sustancias que estarán disponibles para destrucción en los próximos años en Colombia, mediante el análisis de los bancos de SAO y HFC, y una extensa revisión documental sobre la implementación de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC a nivel internacional y nacional. La información recopilada se usó para identificar algunas barreras para la implementación de estas tecnologías en Colombia; así como para la evaluación de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC en función de criterios técnicos, ambientales y económicos. Por último, se identificaron algunas posibilidades de investigación relacionadas con la destrucción de las SAO y HFC en el país.

Debido a la dificultad de conseguir información para otros sectores, el análisis de los bancos de SAO y HFC se realizó únicamente para el sector de refrigeración y acondicionamiento del aire, aunque se resalta que este sector representa el 90% del consumo de SAO y HFC en Colombia.

Para la evaluación de las tecnologías se empleó el análisis de decisiones con criterios múltiples, aplicando una metodología híbrida AHP-PROMETHEE. Se consideraron únicamente tecnologías aprobadas por el Protocolo de Montreal para destrucción de fuentes concentradas de CFC y HCFC y que han sido recomendadas para aprobación o tienen un alto potencial para la destrucción de fuentes concentradas de HFC. No se evaluaron tecnologías para destrucción de sustancias bromadas o halones, ya que no se requieren en Colombia.

Los resultados de este trabajo se presentan en cinco capítulos, seguidos de las conclusiones y recomendaciones.

El capítulo 1 contiene los antecedentes, incluyendo información sobre el impacto ambiental de las SAO y los HFC, así como el contexto internacional y nacional de la implementación del Protocolo de Montreal en Colombia y el contexto nacional de la gestión ambiental aplicado a los residuos de SAO y HFC.

El capítulo 2 está dedicado a los bancos de SAO y HFC. Se presentan las generalidades y definiciones de los bancos de SAO y HFC, el contexto internacional de los bancos de SAO y HFC y la estimación a nivel nacional de los bancos de estas sustancias potencial y efectivamente disponibles para destrucción.

En el capítulo 3 se presenta el estado del arte de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC a nivel internacional. Se incluye una revisión de tecnologías evaluadas y aprobadas por el Protocolo de Montreal, así como una revisión de otras tecnologías de destrucción de SAO que no han sido aprobadas por el Protocolo de Montreal, pero que, sin embargo, se ha demostrado que funcionan de acuerdo con las directrices y criterios de referencia establecidos por el Grupo de Evaluación Tecnológica y Económica del Protocolo. Asimismo, se incluye una revisión del estado actual de la implementación de las tecnologías en Colombia y una estimación de la capacidad requerida para la destrucción de SAO en el país. Por último, se incluye un análisis de las barreras para la implementación de estas tecnologías en Colombia.

El capítulo 4 describe la metodología usada para la evaluación de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC y los resultados obtenidos. Inicialmente, se presentan las bases teóricas del análisis de decisiones con criterios múltiples (MCDA), y los métodos AHP y PROMETHEE. Posteriormente, se describe la definición del problema (tecnologías a evaluar y criterios de evaluación) y la aplicación combinada de los métodos AHP y PROMETHEE para clasificar las tecnologías según su desempeño en los aspectos técnicos, ambientales, económicos y de manera integrada. Por último, se presentan los resultados obtenidos en la evaluación.

En el capítulo 5 se presenta la encuesta realizada con el propósito de identificar un posible potencial de investigación relacionado con tecnologías para la destrucción de SAO y HFC, en Colombia, y los resultados obtenidos.

Por último, se presentan las conclusiones del trabajo y recomendaciones para trabajos futuros.

# **1. ANTECEDENTES**

## **1.1. Sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO) e Hidroclorofluorocarbonos (HFC)**

Las sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO) son compuestos químicos antropogénicos, que contienen bromo y cloro, y tienen una vida atmosférica lo suficientemente larga como para ser transportados a la estratosfera, donde son disociados por la luz ultravioleta de onda corta, liberando átomos de bromo y cloro, lo que conlleva la destrucción catalítica del ozono estratosférico.

Las SAO más reconocidas son el bromuro de metilo, el metilcloroformo, el tetracloruro de carbono, los halones, los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC). Estas sustancias se utilizan como refrigerantes, agentes extintores de incendios, disolventes para la limpieza de equipos electrónicos, agentes espumantes para la producción de espuma de poliuretano rígido y fumigantes agrícolas.

Los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarburos (PFC) son sustancias usadas como sustitutos de las SAO, que no agotan el ozono estratosférico debido a que no contienen cloro. Sin embargo, debido a su contenido de flúor, estas sustancias son potentes gases de efecto invernadero (GEI), con un alto potencial de calentamiento atmosférico (PCA), por lo que fueron incluidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en el Protocolo de Kioto.

Los halocarbonos, incluidos los CFC, HCFC, PFC y HFC son considerados GEI, debido a su capacidad de absorber la radiación infrarroja emitida por la Tierra. Las moléculas de halocarbonos pueden ser varios miles de veces más eficaces en la absorción de la energía radiante emitida por la Tierra que una molécula de CO<sub>2</sub>, por lo que pequeñas cantidades de estos gases pueden contribuir significativamente al cambio climático (IPCC/TEAP, 2005).

## **1.2. Impacto ambiental de las SAO y los HFC**

### **1.2.1. Agotamiento de la capa de ozono**

Se denomina “capa de ozono” a la región de la estratosfera donde se concentra la mayor cantidad (cerca del 90%) del ozono (O<sub>3</sub>) presente en la atmósfera terrestre, aproximadamente entre los 15 y los 50 kilómetros. La capa de ozono tiene un espesor de aproximadamente 40 km, que varía según la época del año y el lugar geográfico, y rodea la Tierra actuando como un escudo protector contra los rayos ultravioleta B (UV-B) procedentes del sol, los cuales son peligrosos para la salud humana y los ecosistemas.

Las SAO son sustancias químicas muy estables y persistentes, lo que les permite permanecer activas en la atmósfera hasta que son removidas o convertidas químicamente. Los clorofluorocarbonos (CFC) son removidos de la atmósfera en rangos entre los 50 y los 100 años, mientras que los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y los hidrofluorocarbonos

(HFC) son removidos mediante procesos de oxidación química y sus tiempos de vida media son inferiores a los 20 años (IDEAM, n.d.).

El tiempo de vida media atmosférico de las SAO les permite para ser transportadas a la estratósfera, donde son disociadas por la luz ultravioleta de onda corta, liberando los átomos de bromo y cloro, lo que conlleva la destrucción catalítica del ozono estratosférico.

La unidad de medida para determinar la capacidad de agotamiento de la capa de ozono de una sustancia es el Potencial de Agotamiento de Ozono (PAO u ODP, por sus siglas en inglés). El PAO es la relación del impacto sobre el ozono que posee una sustancia química comparada con el impacto de una masa igual de CFC-11. El PAO del CFC-11 es definido como 1, mientras que otros CFC y HCFC tienen PAO en el intervalo entre 0,01 y 1,0 (Salawithc et al., 2019).

El agujero de la capa de ozono, descubierto en los años 80, es una zona de la estratósfera con un contenido de ozono inferior a 220 Unidades Dobson (UD)<sup>1</sup>. Este fenómeno se presenta principalmente en la zona polar antártica, donde la masa terrestre se encuentra completamente rodeada de agua, lo que facilita las condiciones para un fenómeno meteorológico que favorece la aparición de zonas especialmente frías durante el invierno polar. Las bajas temperaturas (< -78 °C) favorecen la formación de nubes estratosféricas polares, donde las SAO permanecen inactivas., hasta que llegan los rayos del sol en agosto, septiembre y octubre de cada año, descongelando las nubes y liberando las SAO, que reaccionan con el ozono, lo que conduce a una reducción de hasta del 60% de los niveles de ozono estratosférico. El agotamiento de la capa de ozono también se presenta en el polo norte, aunque solo ocurre en algunos años, entre febrero y abril, y registra una intensidad mucho más baja (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2004).

El agotamiento de la capa de ozono genera un aumento en la radiación ultravioleta, principalmente ultravioleta B (UV-B)<sup>2</sup>, que llega a la superficie terrestre. La exposición a la radiación UV-B puede afectar la salud humana (puede causar cataratas, eritema y quemaduras en la piel, la exposición prolongada puede causar cáncer de piel), otras formas de vida, los ecosistemas y los materiales.

### **1.2.2. Calentamiento global**

Los gases de efecto invernadero (GEI), tanto naturales como antropogénicos, absorben radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra. Esta absorción calienta la atmósfera, estimulándolos a emitir radiación de onda más larga. Parte de esta radiación es liberada al espacio y otra parte es irradiada nuevamente a la superficie de la Tierra. Dos terceras partes de la energía radiante atmosférica son directamente devueltas a la superficie, suministrando una fuente de energía adicional a la radiación solar directa. El efecto neto de este fenómeno permite que la Tierra almacene más energía cerca de su superficie y consecuentemente, la temperatura es más alta. Este proceso es conocido como

---

<sup>1</sup> La unidad para medir la columna de ozono total se denomina Unidad Dobson (UD). Los valores típicos de ozono total en la atmósfera varían entre 200 y 500 UD, con un promedio de 300 UD.

<sup>2</sup> La radiación UV-B se define como la radiación con una longitud de onda en el rango de 282 a 315 nanómetros.

el efecto invernadero natural. Sin el efecto invernadero la temperatura promedio en la superficie sería aproximadamente de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la vida en el planeta no sería posible (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007).

El calentamiento global es generado por la emisión de GEI emitidos por las actividades humanas, que al acumularse en la atmósfera atrapan una mayor parte de la radiación infrarroja proveniente del sol y provocan el incremento a largo plazo de la temperatura media del planeta. El Índice Anual de Gases de Efecto Invernadero (AGGI, por sus siglas en inglés) muestra que, en la última década, el aumento del dióxido de carbono es responsable de cerca del 82% del incremento de la capacidad de la atmósfera para atrapar el calor. Las concentraciones medias mensuales de dióxido de carbono en el mundo han pasado de unas 339 partes por millón en 1980 (media anual) a 412 partes por millón en 2020, lo que supone un aumento de más del 20% (USGCRP, n.d.).

Los principales GEI son el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el ozono ( $\text{O}_3$ ). Además, existen otros gases como los CFC, HCFC, HFC y los perfluorocarbonos (PFC), que pueden ser miles de veces más absorbentes de la radiación infrarroja que una molécula de  $\text{CO}_2$ .

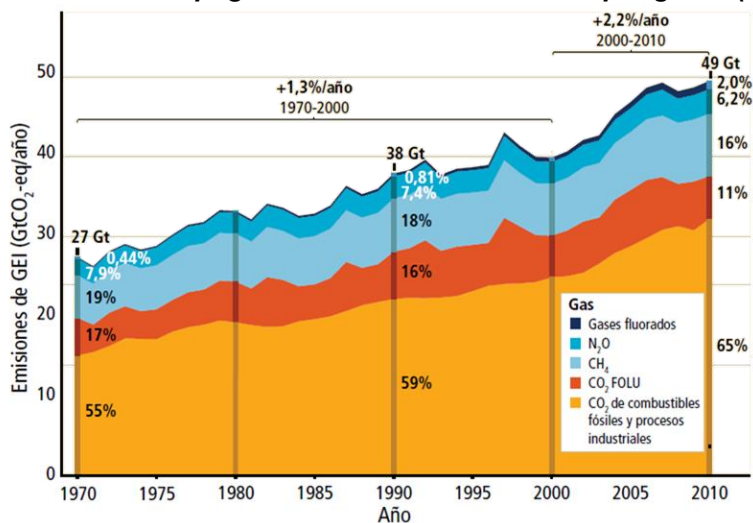
El efecto de los GEI sobre el calentamiento global se mide con el potencial de calentamiento atmosférico (PCA), medida relativa de cuánto calor puede atrapar un determinado GEI, en comparación con el dióxido de carbono. Teniendo en cuenta que los tiempos de vida media atmosférica de las sustancias juegan un papel importante en los valores del PCA, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) acordó usar los valores de PCA basados en un tiempo de 100 años.

De acuerdo con el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014), desde 1950 se han observado cambios en fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, como la disminución de las temperaturas frías extremas, el aumento de las temperaturas cálidas extremas, la elevación de los niveles máximos del mar y el mayor número de precipitaciones intensas en diversas regiones. Asimismo, el IPCC ha estimado que, si las emisiones de GEI antropogénicos continúan creciendo al ritmo actual, la temperatura de la superficie terrestre podría superar en 2036 el límite de  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , considerado como un calentamiento global “peligroso”, con efectos potencialmente dañinos para los ecosistemas y la biodiversidad.

En 2016 entró en vigor el Acuerdo de París, tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante, que tiene por objetivo limitar el aumento de la temperatura media mundial por debajo de  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  y preferiblemente a  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático. Para alcanzar este objetivo, los países se proponen alcanzar el máximo de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero lo antes posible para lograr un planeta con clima neutro para mediados de siglo (UNFCCC, n.d.-b).

Para el año 2010 las emisiones globales de GEI fueron estimadas en 49 Gt  $\text{CO}_2\text{eq}$ , de las cuales únicamente el 2% eran gases fluorados (HFC, PFC y  $\text{SF}_6$ ), como se muestra en la Figura 1-1. Por su parte, en Colombia las emisiones totales de GEI para el 2010 fueron estimadas en 230,3 Mt  $\text{CO}_2\text{eq}$ , es decir el 0,47% de las emisiones globales de GEI. Los gases fluorados representaron únicamente el 0,49% (0,44% HFC y 0,05%  $\text{SF}_6$ ) de las emisiones totales de Colombia para ese año, lo que equivale a 1 Mt  $\text{CO}_2\text{eq}$  de emisiones de HFC (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2018, p. 118).

**Figura 1-1 Emisiones antropógenas anuales totales de GEI por gases (1970 – 2010)**



Fuente: (IPCC, 2015)

### 1.2.3. Indicadores de impacto ambiental para las SAO y HFC

En la Tabla 1-1 se incluyen el Potencial de Agotamiento de Ozono (PAO), el Potencial de Calentamiento Atmosférico (PCA) y el tiempo de vida media en la atmósfera para las principales SAO y HFC usadas en Colombia.

**Tabla 1-1 PAO y PCA para las principales SAO y HFC usadas en Colombia**

Sustancia	Formula química	PAO <sup>a</sup>	PCA (100 años) <sup>a</sup>	Vida media atmosférica (años) <sup>b</sup>
CFC-11	CFCl <sub>3</sub>	1,0	4750	45
CFC-12	CFCl <sub>2</sub>	1,0	10900	100
HCFC-22	CHF <sub>2</sub> Cl	0,055	1810	12
HCFC-123	F <sub>3</sub> C-CClF <sub>2</sub>	0,02	77	1,3
HCFC-141b	CH <sub>3</sub> CFCl <sub>2</sub>	0,11	725	9,3
HCFC-142b	CH <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> Cl	0,065	2310	17,9
HFC-134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	-	1430	14
HFC-245fa	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	-	1030	7,6
HFC-365mfc	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	-	794	8,6
HFC-227ea	CF <sub>3</sub> CHFCF <sub>3</sub>	-	3220	34,2
HFC-236fa	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	-	9810	240
HFC-43-10mee	CF <sub>3</sub> CHFCHFCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	-	1640	15,9
HFC-32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	-	675	4,9
HFC-125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	-	3500	29
HFC-143a	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	-	4470	52
HFC-152a	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	-	124	1,4

<sup>a</sup> Datos tomados de (PNUMA, 2019)

<sup>b</sup> Datos tomados de (IPCC, 2007)

Fuente: Elaboración propia, a partir de (IPCC, 2007; PNUMA, 2019)

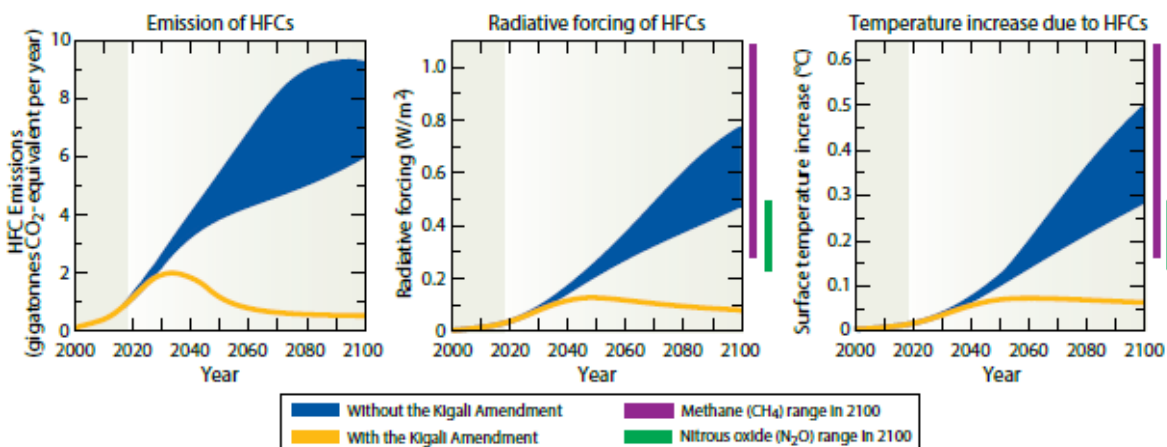
### 1.3. Protocolo de Montreal

El descubrimiento del agujero en la capa de ozono sobre la Antártida y sus repercusiones en la salud humana y el medio ambiente, condujeron a la firma del Convenio de Viena en 1985 y posteriormente en 1987 a la adopción del Protocolo de Montreal, para proteger la capa de ozono estratosférico mediante la eliminación gradual del consumo de SAO<sup>3</sup>. En 2009, el Protocolo de Montreal se convirtió en el primer tratado internacional en lograr la ratificación universal por los 196 países miembro de las Naciones Unidas.

El Protocolo de Montreal está estructurado de manera que los países desarrollados actúen en primer lugar y que los países en desarrollo (definidos en el artículo 5 del Protocolo) actúen luego, con ayuda financiera del Fondo Multilateral para la implementación del Protocolo de Montreal (FML). El documento del Protocolo ha sido revisado en ocho ocasiones, mediante las enmiendas de Londres (1990), Nairobi (1991), Copenhague (1992), Bangkok (1993), Viena (1995), Montreal (1997), Pekín (1999) y Kigali (2016).

La enmienda de Kigali fue aprobada en 2016, con el propósito de reducir a partir de 2019 el consumo y la producción de hidrofluorocarbonos (HFC). De acuerdo con la CMNUCC, la concentración de los HFC en la atmósfera está creciendo rápidamente, entre un 10 % y un 15 % al año y se estima que las emisiones de HFC sean entre el 9 y 19 % del total de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> para el año 2050, si no se toman medidas de eliminación. La reducción de las emisiones de HFC podría prevenir el aumento de hasta un 0,1°C en 2050 y hasta un 0,5°C en 2100 (Figura 1-2), lo que supone una de las estrategias de mitigación climática más rentable disponible hoy en el mundo (UNFCCC, n.d.-a).

**Figura 1-2 Beneficios climáticos de la Enmienda de Kigali**



Fuente: (Salawithc et al., 2019)

<sup>3</sup> De acuerdo con el Protocolo de Montreal, el consumo nacional de una SAO se define como la producción nacional más las importaciones de la sustancia menos su exportación a otras naciones.

### 1.3.1. Implementación del Protocolo de Montreal en Colombia

Colombia aprobó el Convenio de Viena a través de la ley 30 del 5 de marzo de 1990 y el Protocolo de Montreal a través de la ley 29 de 1992. Adicionalmente, ratificó la Enmienda de Kigali mediante la Ley 369 de 2019.

La Unidad Técnica Ozono (UTO) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es la encargada de asesorar al Gobierno Nacional para establecer políticas, planes, programas y proyectos, con el propósito de lograr el cumplimiento de los compromisos adquiridos por el país frente al Protocolo de Montreal y sus enmiendas.

En la Tabla 1-2 se presenta el cronograma de eliminación para las Sustancias Controladas por el Protocolo de Montreal (SCPM) aplicable a Colombia.

**Tabla 1-2 Cronograma de eliminación del consumo<sup>4</sup> de SCPM aplicable a Colombia**

Grupo	Tipo de SCPM	Periodo de la Línea Base	Primera medida de control para países Art. 5	Eliminación definitiva para países Art. 5
A-I	CFC (CFC-11, CFC-12, CFC-13, CFC-114, CFC-115)	1995 a 1997	1999 – Congelación de consumo	2005 - Reducción del 50 % 2007- Reducción del 85 % 2010 - Eliminación del 100 %
A-II	Halones (halón-1211, halón-1301, halón-2404)	1995 a 1997	2002 – Congelación de consumo	2005 - Reducción del 50 % 2010 - Eliminación del 100 %
B-I	Otros CFC (CFC-13, CFC-111, CFC-112, CFC-211, CFC-212, CFC-213, CFC-214, CFC-215, CFC-216, CFC-217)	1998 a 2000	2003 - Reducción del 20% del consumo	2007 - Reducción del 85 % 2010 - Eliminación del 100 %
B-II	Tetracloruro de carbono	1998 a 2000	2005 - Reducción del 85% del consumo	2010 - Eliminación del 100 %
B-III	Metilcloroformo (1,1,1-tricloroetano)	1998 a 2000	2003 – Congelación de consumo	2005 - Reducción del 30 % 2010 - Reducción del 70 % 2015 - Eliminación del 100 %
C-I	HCFC	2009 a 2010	2013 -Congelación de consumo	2015 - Reducción del 10 % 2020 - Reducción del 60 % 2021 - Reducción del 65 % 2025 - Reducción del 67,5 % 2030 - Reducción del 97,5 % 2040 - Eliminación del 100 %
C-II	HBFC	-	-	1996 - Eliminación
C-III	Bromoclorometano	-	-	2002 - Eliminación
E	Bromuro de metilo	1995 a 1998	2002 - Congelación de consumo	2005 – Reducción del 20 % 2015 - Eliminación del 100 %
F-I	HFC (HFC-134, HFC-134a, HFC-143, HFC-245fa, HFC-365mfc, HFC-227ea, HFC-236cb, HFC-236ea, HFC-236fa, HFC-245ca, HFC-43-10mee, HFC-32, HFC-125, HFC-143a, HFC-41, HFC-152, HFC-152a)	2020 a 2022	2024 – Congelación del consumo	2029 - Reducción del 10 % 2035 - Reducción del 30 % 2040 - Reducción del 50 % 2045 - Reducción del 80 %
F-II	HFC-23			

Fuente: (UTO, 2020b)

<sup>4</sup> De acuerdo con el Protocolo de Montreal, el consumo nacional de una SAO se define como la producción nacional más las importaciones de la sustancia menos su exportación a otras naciones

De acuerdo con la UTO, Colombia cumplió con los compromisos de eliminación total del consumo de CFC, halones, tetracloruro de carbono, metilcloroformo y bromuro de metilo, a través de la prohibición total de las importaciones de estas sustancias a partir del 1 de enero de 2010. Actualmente, el país trabaja en la eliminación del consumo de los HCFC, con la meta de eliminación del 97,5% del consumo para el año 2030 y el 100% para el 2040.

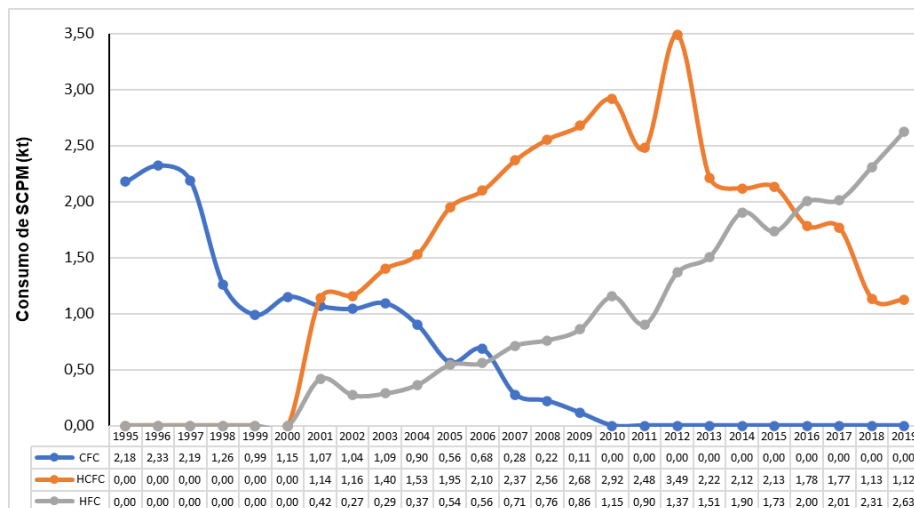
Adicionalmente, la línea base de consumo de HFC se definirá como el promedio de los consumos de estas sustancias en los años 2020, 2021 y 2022. La primera medida de control para los HFC será la congelación del consumo al nivel de la línea base en el 2024 y posteriormente, en 2029 se iniciará la reducción del 10% consumo de estas sustancias, con la meta de alcanzar la reducción del 80% en 2045.

### 1.3.2. Consumo de SAO y HFC en Colombia

En Colombia no se producen SAO ni HFC, por lo que el consumo de SCPM para el país se calcula como las importaciones menos las exportaciones de estas sustancias, siendo las exportaciones en la mayoría de los casos nulas.

En la Figura 1-3 se muestra el consumo de SCPM en Colombia desde 1995 hasta 2019. En cumplimiento del cronograma de eliminación, el consumo de los CFC se eliminó en el 2010; el consumo de HCFC inició en el 2000, alcanzó su máximo en el 2012 y se ha ido reduciendo desde el 2013; el consumo de HFC en el país también inició en el 2000 y ha venido incrementándose año a año.

**Figura 1-3 Consumo de SCPM en Colombia (1995 - 2019)**



Fuente: Elaborado a partir de datos proporcionados por UTO, 2020

Para el año 2019, se importaron al país 1124 toneladas de HCFC y 2628 toneladas de HFC. Las sustancias más importadas fueron el HFC-134a, HCFC-22, R-410A, HCFC-141b y R-507A, las cuales representaron el 92 % de las importaciones de SCPM para ese año (Tabla 1-3).

**Tabla 1-3 Consumo de SCPM en Colombia (2019)**

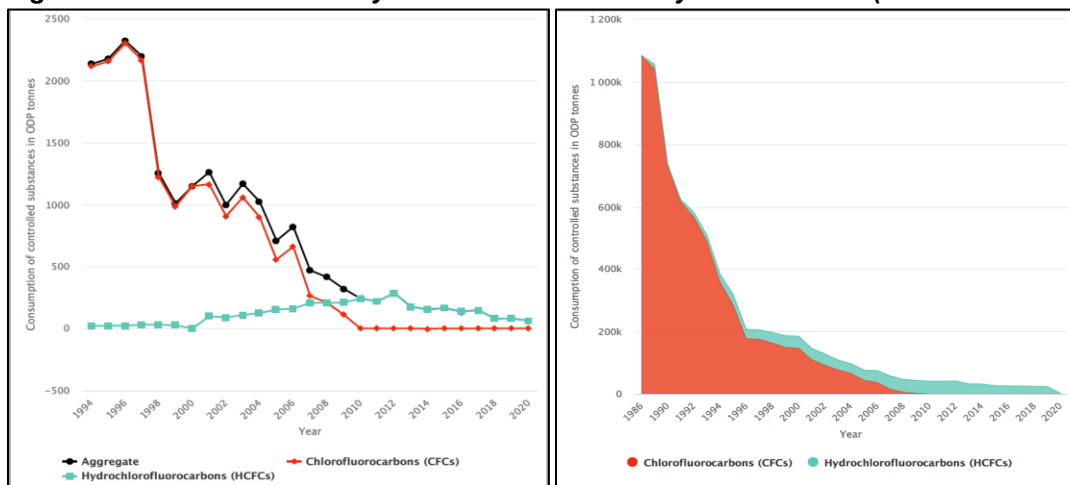
SUSTANCIA	TOTAL SUSTANCIA	
	kg	(%)
HFC-134a	1483289	39,53
HCFC-22	765231	20,40
R-410A	594885	15,86
HCFC-141b	348606	9,29
R-507A	259360	6,91
R-404A	188295	5,02
HFC-152a	24044	0,64
HFC 365mfc/HFC 227ea (93/7)	22080	0,59
R-437A	22005	0,59
R-407C	13915	0,37
HCFC-123	10500	0,28
Otros HFC	19757	0,53
<b>TOTAL</b>	<b>3751967</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaborado a partir de datos proporcionados por UTO, 2020

En la Figura 1-4 se muestra el consumo histórico de CFC y HCFC para Colombia y a nivel mundial en toneladas PAO. Como se puede observar, el consumo de CFC de Colombia alcanzó un máximo de 2300 t PAO en 1996 y se eliminó en 2010, mientras que el consumo de HCFC inició en el año 2001 y alcanzó un máximo de 285 t PAO en 2012, a partir de ese año el consumo de HCFC disminuye debido a los controles implementados por el país para cumplir con el Protocolo de Montreal.

A nivel mundial, el consumo de CFC alcanzó un máximo de 1084 kt PAO en 1986 y para 1996 fue de 178 kt PAO, mientras el consumo de HCFC alcanzó un máximo de 42 kt PAO en el 2012. Estas cifras demuestran que el consumo de SAO en Colombia representa alrededor del 1% del consumo mundial de estas sustancias.

**Figura 1-4 Consumo de CFC y HCFC a nivel mundial y en Colombia (toneladas PAO)**



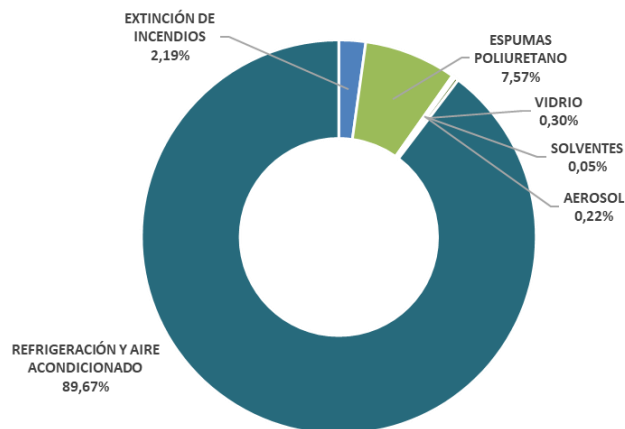
a) Consumo en Colombia

b) Consumo a nivel mundial

Fuente: (UNEP, n.d.)

Como se muestra en la Figura 1-5, en Colombia las SAO y HFC son usadas principalmente como refrigerantes (89,67%), agentes espumantes (7,57%), agentes extintores de incendios (2,19%) y en menor medida como propelentes para aerosoles y solventes.

**Figura 1-5 Consumo de SAO y HFC en Colombia por sectores usuarios (2018)**



Fuente: (Unidad Técnica Ozono, 2020)

## 1.4. Gestión ambiental de residuos de SAO y HFC en Colombia

### 1.4.1. Generalidades de los residuos peligrosos

De acuerdo con el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, *“un residuo peligroso es aquel residuo o desecho que, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas, puede causar riesgos, daños o efectos no deseados, directos e indirectos, a la salud humana y el ambiente. Así mismo, se considerará residuo peligroso los empaques, envases y embalajes que estuvieron en contacto con ellos”*<sup>5</sup>.

Las SAO y HFC no deseadas o contaminadas se clasifican como residuos peligrosos debido a los efectos adversos directos sobre el ambiente e indirectos sobre la salud humana, derivados de la liberación de estas sustancias a la atmósfera. Estas sustancias se encuentran incluidas en el listado de residuos peligrosos del Decreto 1076 de 2015, Anexo I, corriente Y45.

### 1.4.2. Principio de jerarquía para la gestión de residuos peligrosos

El principio de jerarquía establece las directrices para la selección de la mejor opción de gestión posible para los residuos peligrosos, mediante una secuencia de modalidades de

<sup>5</sup> Decreto 1076 de 2015, Título 6, Capítulo 1, Sección 1, Artículo 2.2.6.1.1.3.

gestión ordenada de mayor a menor impacto ambiental, teniendo como prioridad la prevención de la generación de los residuos peligrosos (Figura 1-6).

**Figura 1-6 Principio de jerarquía para la gestión de residuos peligrosos**



Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020)

De acuerdo con el Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible (2020), las etapas de la gestión de residuos peligrosos comprenden la prevención, el aprovechamiento o valorización de materiales, el aprovechamiento o valorización energética y la disposición de los residuos.

**Prevención:** comprende aquellas medidas que se adoptan antes de que una sustancia, material o producto se convierta en un residuo, tanto para reducir su cantidad como su peligrosidad, a través de tres tipos de acciones: evitar la generación, reducir en la fuente, reutilizar.

**Aprovechamiento o la valorización de materiales:** recuperar los materiales contenidos en los residuos, para un fin útil, ya sea para su finalidad original como para cualquier otra. En esta etapa se incluyen las operaciones de reciclaje y de regeneración, entre otras.

**Valorización energética:** aprovechar o recuperar el poder calorífico contenido en los residuos para utilizarlos como combustible u otros medios de generación de energía, a través de una variedad de procesos, que incluyen la combustión y el co-procesamiento, entre otros. Se habla técnicamente de valorización energética cuando se dan algunas condiciones, entre las que cabe destacar que el proceso sea de alta eficiencia energética, que haya una demanda real de esa energía y que la energía obtenida sustituya a otras energías procedentes de recursos energéticos no renovables

**Disposición:** es la opción menos sostenible, que se debe utilizar cuando no existe otra aplicable. En el caso de las SAO y los HFC, la disposición debe realizarse utilizando una tecnología de destrucción aprobada por el Protocolo de Montreal.

### **1.4.3. Importación y exportación de residuos de SAO**

Los residuos de SAO se clasifican como residuos peligrosos y se encuentran incluidas en el Convenio de Basilea<sup>6</sup> (Anexo I, Y45 “Residuos que tengan como constituyentes compuestos organohalogenados no incluidos en ninguna otra categoría”), por lo que un país que haya ratificado el Convenio y no tenga suficiente capacidad de destrucción local requiere cumplir con los requisitos establecidos en el Convenio para la exportación de residuos de SAO (GIZ, 2015).

Bajo el Convenio de Basilea, cada país puede imponer regulaciones más estrictas para la importación de residuos peligrosos. Colombia, mediante la Ley 1252 de 2008, prohibió la introducción, importación o tráfico de residuos o desechos peligrosos al territorio nacional, por parte de cualquier persona natural o jurídica, de carácter público o privado. De igual forma, se prohibió la disposición o recepción final de residuos peligrosos en rellenos sanitarios que no cumplan con la capacidad o condiciones físicas y técnicas adecuadas para tal fin.

Teniendo en cuenta lo anterior, en Colombia cuando una persona natural o jurídica requiere realizar la exportación de residuos peligrosos, incluidos SAO y HFC, hacia un país que sea parte del Convenio de Basilea, miembro de la OCDE o de la Comunidad Europea, por razones de falta de capacidad nacional para el manejo ambientalmente adecuado de los residuos, se debe solicitar una autorización a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

Estas condiciones hacen que la exportación de SAO para destrucción sea más costosa que la destrucción en el país. Para el año 2012 la destrucción de SAO en el exterior tenía un costo de aproximadamente USD\$10/kg y actualmente se estima en 15 USD\$/kg, mientras que el costo estimado de destrucción de SAO en Colombia es de 6,5 USD\$/kg<sup>7</sup>. En el país se realizaron unas pocas exportaciones de SAO para destrucción entre 2010 y 2012, sin embargo, debido a los altos costos, desde el 2012 no se han realizado más exportaciones y las SAO residuales son almacenadas por los gestores de residuos peligrosos, en espera de que entre en funcionamiento el horno rotatorio para la destrucción de SAO (Ver capítulo 3, numeral 3.5).

### **1.4.4. Red de recuperación, reciclaje y regeneración de refrigerantes**

En Colombia, la Unidad Técnica Ozono implementó la Red de Recuperación, Reciclaje y Regeneración de gases refrigerantes (Red R&R&R), como una medida para favorecer la recuperación y reutilización de las sustancias refrigerantes (CFC, HCFC y HFC), así como para reducir la cantidad de estas sustancias contaminadas que deben ser destruidas.

---

<sup>6</sup> El Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos y su eliminación fue firmado en 1989 y entró en vigor en 1992. Colombia aprobó el Convenio de Basilea mediante la Ley 253 de 1996.

<sup>7</sup> Datos proporcionados por LITO S.A.S.

La Red R&R&R está compuesta por 18 centros de acopio y 6 centros de regeneración, con licencia ambiental para la gestión de residuos de SAO y HFC. Los centros de acopio cumplen las funciones de recibir de los técnicos los refrigerantes contaminado para enviarlo a la etapa de regeneración, y vender gas regenerado, para que vuelva a la cadena productiva. Los centros de regeneración, ubicados en Bogotá, Cali, Medellín, Pereira, Barranquilla y Bucaramanga, se encargan de realizar un proceso de limpieza profunda de los gases refrigerantes recuperados (regeneración), en el cual se retiran principalmente sólidos, humedad y acidez.

Cada centro de regeneración tiene una capacidad para procesar 19 t/año de refrigerante aproximadamente, lo que representa una capacidad total de regeneración de 115 t/año para el país.

#### **1.4.5. Posconsumo de neveras y equipos de acondicionamiento de aire**

A nivel nacional, el programa de posconsumo de electrodomésticos Red Verde se encarga de la recolección y gestión ambiental de electrodomésticos cuando han cumplido su ciclo de vida y son descartados por los consumidores, incluyendo neveras, domésticas y comerciales, y aires acondicionados. A través de Red Verde se implementa el programa nacional de sustitución de neveras “Entrégala y ahorra”, por el cual promueve la sustitución de neveras viejas que tienen un alto consumo de energía y contienen gases refrigerantes que destruyen la capa de ozono y contribuyen al calentamiento global. El programa recibe las neveras viejas y entrega un certificado con el cual se puede acceder al beneficio del IVA diferencial del 5% en la compra de neveras nuevas, con eficiencia energética A, B o C y sin SAO, para los habitantes de estratos 1, 2 y 3<sup>8</sup>. Las neveras recolectadas a través del programa “Entrégala y ahorra” son entregadas a los gestores de residuos peligrosos para su gestión (Programa Nacional de Sustitución de Neveras, n.d.).

Adicionalmente, el Programa de Eficiencia Energética Caribe Energía Sostenible (PEECES) se encuentra desarrollando el programa CARIBE EFICIENTE, el cual busca sustituir aproximadamente 55 mil equipos de refrigeración doméstica en los departamentos de Atlántico, Bolívar y Córdoba. Este programa otorga un beneficio de 400 mil pesos a cada uno de los beneficiarios para promover la sustitución de los equipos de refrigeración por equipos con mejor eficiencia (etiquetado RETIQ A), permitiendo a los usuarios obtener ahorros estimados en los consumos de energía entre un 40% y un 60% (PEECES, n.d.).

Los electrodomésticos recibidos por estos programas son entregados a gestores de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos con licencia ambiental, quienes separan los diferentes materiales para enviarlos a los procesos de aprovechamiento y disposición final. Actualmente, los gases refrigerantes son extraídos y enviados a los centros de regeneración si no están contaminados, mientras que los gases refrigerantes contaminados y las espumas de poliuretano que contienen SAO son almacenados por los gestores, en espera de que se pueda realizar su destrucción en Colombia.

---

<sup>8</sup> Decreto 2143 de 2017

## 2. BANCOS DE SAO Y HFC

### 2.1. Generalidades de los bancos de SAO

Se denominan bancos de SAO a la cantidad total de sustancias contenidas en equipos existentes, reservas químicas, espumas y otros productos, que aún no se han liberado a la atmósfera (IPCC/TEAP, 2005).

Los bancos de SAO y HFC pueden estar contenidos en equipos y productos tales como refrigeradores y equipos de acondicionamiento del aire (refrigerante y agente espumante), en la espuma usada como aislamiento térmico y acústico de los edificios y en los sistemas de protección contra incendios, así como en las existencias que poseen los países y los usuarios industriales y comerciales. Estos bancos podrían ser liberados con el tiempo a la atmósfera, contribuyendo al deterioro de la capa de ozono y al calentamiento global. Sin embargo, las sustancias no deseadas y/o contaminadas pueden ser recuperadas de un equipo o producto, almacenadas en tanques o cilindros y posteriormente ser tratadas para su reutilización o para su destrucción cuando no tienen valor comercial (ICF, 2018).

La mayoría de las SAO no deseadas que puedan ser recuperadas son CFC y HCFC provenientes de equipos de refrigeración y acondicionamiento del aire. La espuma que contiene SAO también puede ser recuperada, principalmente de los equipos de refrigeración, aunque este proceso suele ser costoso y requiere mayor esfuerzo que la recuperación del refrigerante. La espuma puede ser destruida entera, lo que se considera como una fuente diluida de SAO, o se puede recuperar la SAO usada como agente espumante, para ser reutilizada o destruida (ICF, 2018).

Asimismo, es posible recuperar SAO del sector de extinción de incendios, principalmente halones. Sin embargo, aún se requieren existencias de halones recuperados, reciclados o regenerados para su reutilización en equipos de protección contra incendios, principalmente del sector de aviación civil y militar, por lo que no se recomienda su destrucción (PNUMA, 2019).

El consumo de otras SAO como el tetracloruro de carbono, el bromuro de metilo y el metilcloroformo, fue eliminado a nivel mundial en los años 2010 y 2015 y, debido a su uso como disolventes, plaguicidas o materia prima para la producción de otros productos químicos, no hay bancos significativos conocidos de estos productos químicos, ya que se liberan a la atmósfera durante su uso o se transforman (GIZ, 2015).

Es importante tener en cuenta que no todos los bancos de SAO están disponibles para la gestión. Los bancos *potencialmente disponibles para la gestión* están compuestos por las SAO que pueden recuperarse cuando los productos y equipos entran en el flujo de residuos. Sin embargo, sólo una fracción será captada por el sistema de recolección y quedará *efectivamente disponible para la gestión*, dependiendo de los sistemas de recolección y las tasas de recuperación de cada país (GIZ, 2015).

## 2.2. Metodologías para el cálculo de bancos de SAO y HFC

Los inventarios de bancos de SAO y HFC permiten cuantificar el potencial de mitigación de emisiones de estas sustancias, generar medidas y políticas para la gestión de los bancos de SAO, así como tomar decisiones sobre la exportación o destrucción local de las sustancias. Estos inventarios se pueden calcular con un enfoque en los equipos que contienen las sustancias o con un enfoque en el consumo de las sustancias.

### 2.2.1. Enfoque en equipos (Bottom-up)

Como ya se dijo, los bancos de SAO y HFC están contenidos principalmente en equipos y de refrigeración y acondicionamiento del aire (RAC) y en espumas de aislamiento térmico. En la Tabla 2-1 se muestran los equipos que se recomienda tener en cuenta para elaborar el inventario de bancos de SAO y HFC.

**Tabla 2-1 Equipos que contienen SAO y HFC**

SUBSECTOR	TIPO DE EQUIPO	REFRIGERANTE	AGENTE ESPUMANTE
Aire acondicionado estacionario (A/C)	A/C integrado	x	
	A/C tipo split sin ducto	x	
	A/C tipo split con ducto	x	
	A/C tipo techo con ducto	x	
Chillers	Chillers de A/C	x	
	Chillers de proceso*	x	
Aire acondicionado móvil	A/C para automóvil	x	
	A/C para vehículo grande*	x	
Refrigeración doméstica	Refrigeradores domésticos	x	x
Refrigeración comercial	Equipos autocontenidos	x	x
	Unidades condensadoras*	x	x
	Sistemas centralizados para supermercados*	x	x
Refrigeración industrial	Equipos autocontenidos	x	x
	Unidades condensadoras*	x	x
	Sistemas centralizados	x	x
Transporte refrigerado	Camiones y contenedores refrigerados*	x	x

Fuente: (GIZ, 2019)

El enfoque de equipos requiere contar con información de la vida útil promedio y existencias (número de unidades), así como de la distribución y cantidad de los diferentes refrigerantes o agentes espumantes incluidos en cada categoría. En la Figura 2-1 se muestra el proceso para obtener esta información.

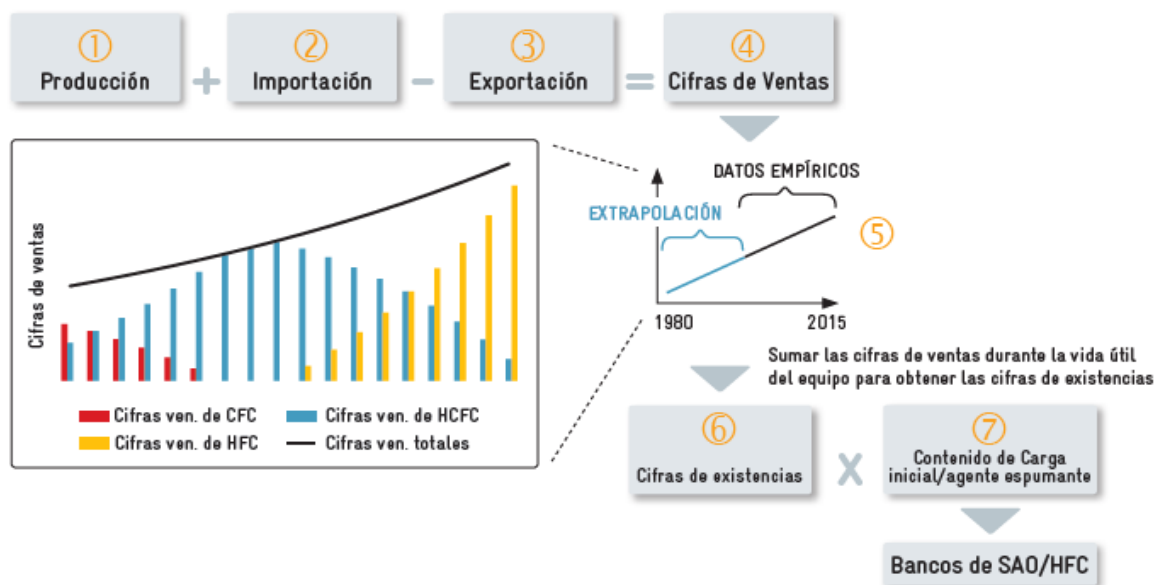
Las cifras de ventas deben presentarse en una línea de tiempo de mínimo 5 años. Estas cifras se extrapolan al pasado usando tasas de crecimiento empíricas o tasas históricas de crecimiento del PIB. Asimismo, para calcular las existencias, se deben extrapolar las cifras de ventas para cubrir la vida útil promedio de los equipos (GIZ, 2019).

Para los equipos marcados con \* en la Tabla 2-1, se recomienda estimar las existencias con otros métodos, en lugar de obtenerlas de las cifras de ventas, debido a que estos equipos no provienen de líneas de ensamblaje, sino que se instalan en sitio. Por ejemplo,

para calcular los bancos de SAO y HFC de los supermercados se puede calcular el área total de supermercados y multiplicarla por el indicador de Kg refrigerante/m<sup>2</sup> (GIZ, 2019).

Las SAO potencialmente disponibles se pueden determinar a partir de las cifras de ventas históricas en el momento en que los equipos entraron al mercado, o al dividir las cifras de existencias actuales por el promedio de vida útil de los equipos. Ambos métodos proporcionan el número de equipos que se retiran de servicio porque llegan al final de su vida útil y al multiplicar este número por la carga inicial de refrigerante se obtiene la cantidad de SAO potencialmente disponible para gestión. Las SAO efectivamente disponibles para la gestión se calculan multiplicando las SAO potencialmente disponibles por una tasa de recuperación dada (GIZ, 2019).

**Figura 2-1 Esquema para la obtención de información para cálculo de inventarios de bancos de SAO y HFC – Énfoco de equipos**



Fuente: (GIZ, 2019, p. 9)

## 2.2.2. Enfoque de sustancias (Top-down)

Este método es similar al método de Nivel 1 para estimar el inventario de emisiones de GEI, del IPCC. En este enfoque se considera el consumo acumulado nacional de sustancias (SAO y HFC) en lugar de los datos de ventas de equipos.

Para este método solamente se usan los datos de las cantidades de sustancias usadas para la fabricación o instalación de equipos de RAC. Los refrigerantes usados para el mantenimiento sustituyen refrigerantes que ya han sido emitidos a la atmósfera, por fugas en los equipos y, por lo tanto, no contribuyen a los bancos de SAO y HFC. Adicionalmente, se requiere contar con datos de importaciones y exportaciones de equipos precargados, para sumar o restar estas cantidades de sustancias (GIZ, 2019).

Debido a que Colombia no es productor de SCPM y a que es parte firmante del Protocolo de Montreal, las cifras de importaciones y exportaciones de estas sustancias son muy precisas, salvo por casos de contrabando no identificados, y de alta confiabilidad, lo que permite hacer un buen cálculo de las sustancias potencialmente disponibles para destrucción con la aproximación top-down.

### a) Cálculo para el sector RAC

El cálculo se basa en la metodología del IPCC 2006 para el nivel 1<sup>9</sup>, considerando que todas las SAO que no se emiten se acumulan en los bancos (UTO & GIZ, 2018):

$$Banco_y = Consumo_y * (1 - EF_{fy}) + Banco_{y-1} * (1 - EF_{banco}) - EOL_y \quad \text{Ecuación 1}$$

$$EOL_y = Consumo_{y-LT} * R_{IC} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

*y* Año.

*LT* Tiempo de vida del equipo que contiene el refrigerante.

*EF<sub>fy</sub>* Factor de emisión en el primer año, teniendo en cuenta pérdidas en transporte, contenedores, etc.

*EF<sub>banco</sub>* Factor de emisión del banco, teniendo en cuenta las fugas de refrigerante durante el uso.

*EOL* Refrigerante contenido en el equipo que se retira de uso (desmantelado).

*R<sub>ic</sub>* Porcentaje del consumo que es usado para la primera carga del equipo con referencia a las recargas durante el tiempo de servicio.

En la Tabla 2-2 se incluyen los factores usados por GIZ para el cálculo de los bancos de SAO a nivel mundial, para el sector RAC.

**Tabla 2-2 Factores para el cálculo de bancos de SAO y HFC para el sector RAC**

Factor	Valor
EF <sub>fy</sub> (%)	10
EF <sub>banco</sub> (%)	20
LT (años)	20
R <sub>ic</sub>	1/3

Fuente: (UTO & GIZ, 2018)

### b) Cálculo para el sector de espumas

El cálculo para el sector de espumas se basa en los supuestos para las espumas de celdas cerradas expuestas en las directrices del IPCC de 2006. Al igual que para el sector RAC, se asume que todas las sustancias químicas que no se emiten forman parte del banco (UTO & GIZ, 2018).

$$Banco_y = Consumo_y * (1 - EF_{fy}) + Banco_{y-1} * (1 - EF_{banco}) - EOL_y \quad \text{Ecuación 3}$$

<sup>9</sup> Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, capítulo 7 (ecuación 7.2A)

$$EOL_y = Consumo_{y-LT} * (1 - EF_{fy} - EF_{banco} * LT) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$y$  Año

$LT$  Tiempo de vida de la espuma

$EF_{fy}$  Factor de emisión en el primer año, teniendo en cuenta pérdidas en transporte, contenedores, etc.

$EF_{banco}$  Factor de emisión del banco, teniendo en cuenta las fugas de agente espumante durante el uso.

$EOL_y$  SAO contenida en la espuma que se saca de uso (desmantelada).

En la Tabla 2-3 se incluyen los factores usados por GIZ para el cálculo de los bancos de SAO a nivel mundial, para el sector de espumas. (UTO & GIZ, 2018)

**Tabla 2-3 Factores para el cálculo de bancos de SAO y HFC para el sector espumas**

Factor	Valor
$EF_{fy}$ (%)	10
$EF_{banco}$ (%)	2
$LT$ (años)	20
$EOL$ (% de la carga inicial)	50

Fuente: (UTO & GIZ, 2018)

## 2.3. Bancos de SAO y HFC a nivel mundial

A manera de referencia, en esta sección se presentan valores de bancos de SAO y HFC estimados a nivel mundial para los sectores de RAC y espumas, que son los más representativos y la mayor fuente de sustancias no deseadas y/o contaminadas que pueden ser recuperadas y posteriormente ser llevadas a destrucción.

**Tabla 2-4 Bancos mundiales de SAO y HFC para 2002 y 2015 (BAU) - RAC y espumas**

	Bancos (kt)					Total
	Refrigeración <sup>a</sup>	A/C <sup>b</sup>	A/C móvil <sup>c</sup>	Espumas	Otros sectores <sup>d</sup>	
<b>2002</b>						
Halones					167	167
CFC	330	84	149	1858	0	2421
HCFC	461	1028	20	1126	23	2658
HFC	180	81	249	12	21	543
<b>Total</b>	<b>971</b>	<b>1193</b>	<b>418</b>	<b>2996</b>	<b>211</b>	<b>5578</b>
<b>2015 (BAU)</b>						
Halones					43	43
CFC	64	27	13	1305	2	1411
HCFC	891	878	23	1502	22	3316
HFC	720	951	635	566	77	2949
<b>Total</b>	<b>1675</b>	<b>1856</b>	<b>671</b>	<b>3373</b>	<b>144</b>	<b>7719</b>

<sup>a</sup> Incluye refrigeración doméstica, comercial e industrial y transporte refrigerado

<sup>b</sup> Incluye aire acondicionado estacionario y calefacción residencial y comercial

<sup>c</sup> Incluye carros, buses y compartimientos de pasajeros de camiones

<sup>d</sup> Incluye aerosoles comerciales y médicos, solventes y protección contra incendios

Fuente: Elaborado a partir de datos de (IPCC/TEAP, 2005)

En 2005, el IPCC y el Grupo de evaluación tecnológica y económica del Protocolo de Montreal (TEAP, por sus siglas en inglés) estimaron los bancos globales de SAO y HFC para el año 2002 en 5789 kt, de los cuales el 45% se encontraba en equipos de RAC, el 52% en espumas y el 3% restante se encontraba en aerosoles, equipos de protección contra incendios y otros sectores. Por otra parte, los CFC representaban el 42% de los bancos estimados, los HCFC el 46%, los HFC el 9% y los halones el 3% (Tabla 2-4).

Adicionalmente, el IPCC y el TEAP estimaron los bancos de SAO y HFC para 2015, en un *escenario Business as usual (BAU)*, en 7719 kt, de los cuales el 54% se encontraba en equipos de RAC, el 44 % en espumas y el 2 % restante en otros sectores. En la Tabla 2-4 se presenta un resumen de los bancos estimados por IPCC/TEAP para 2002 y 2015 (BAU) para los sectores de RAC y espumas.

**Tabla 2-5 Bancos mundiales de HCFC y HFC para 2002, 2015(BAU) y 2020(BAU)**

Sustancias	Grupo países	Bancos (kt)		
		2002	2015 (BAU)	2020 (BAU)
HCFC	nA5 <sup>a</sup>	1997	1438	1206
HCFC	A5 <sup>b</sup>	643	1771	1907
HFC	nA5 <sup>a</sup>	491	1973	2622
HFC	A5 <sup>b</sup>	49	722	1.014
HCFC	Mundial	2640	3209	3113
HFC	Mundial	540	2695	3636
<b>Total</b>		<b>3180</b>	<b>5904</b>	<b>6749</b>

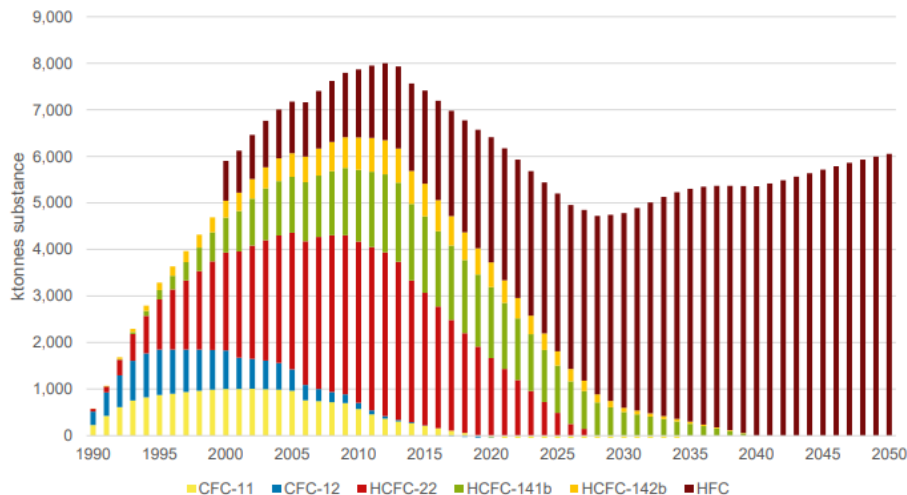
<sup>a</sup> Bancos de HCFC y HFC para países desarrollados (Artículo 2 del Protocolo de Montreal)

<sup>b</sup> Bancos de HCFC y HFC para países en desarrollo (Artículo 5 del Protocolo de Montreal)

Fuente: Elaborado a partir de datos de (UNEP, 2009)

En la Tabla 2-5 se presentan los bancos de HCFC y HFC actualizados por el TEAP en 2009 para el año 2002 y las estimaciones en un escenario BAU para 2015 y 2020. De acuerdo estos datos, en el periodo 2002 a 2020 se esperaba un crecimiento de casi el 200% de los bancos de HCFC para los países en desarrollo, y un decrecimiento de cerca de – 40 % para los países desarrollados. Para los HFC se esperaba un crecimiento de los bancos superior a 500% a nivel mundial.

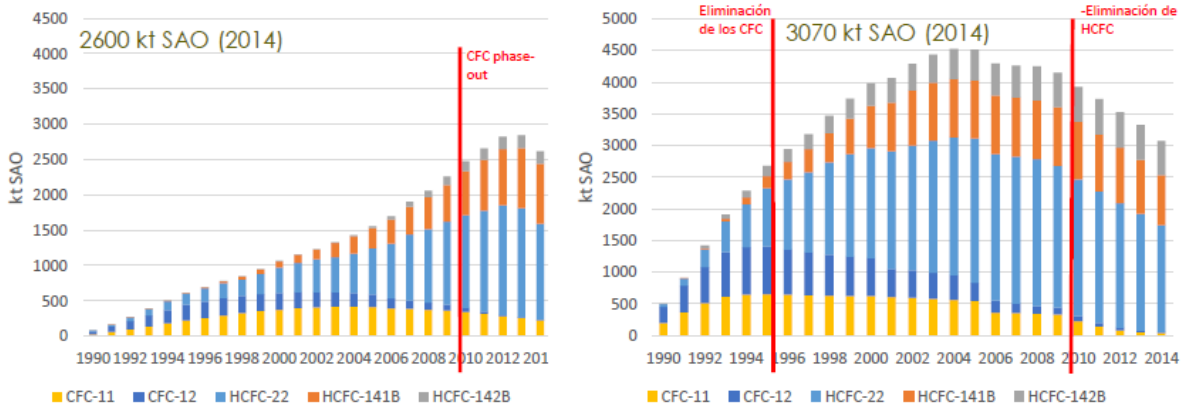
**Figura 2-2 Bancos de SAO y HFC globales**



Fuente: (GIZ, 2018)

Por su parte, GIZ estimó que los bancos mundiales de SAO llegarían a un máximo de 6400 kt en el 2010 y que los bancos de CFC-12 sólo están disponible en pequeñas cantidades actualmente y desaparecerán en 2025. Los mayores bancos de SAO están y seguirán estando en los países desarrollados, principalmente en espumas (CFC-11 principalmente) y refrigerantes HFC, mientras que los países en desarrollo tienen menos de la mitad de los bancos de SAO de los países desarrollados y sus bancos estarán dominados en el futuro por agentes espumantes (CFC/HCFC) y refrigerantes HFC (Figura 2-2 y Figura 2-3).

**Figura 2-3 Bancos de SAO en países A5 y no A5**



a) Bancos de SAO en países A5<sup>a</sup>

b) Bancos de SAO en países no A5<sup>b</sup>

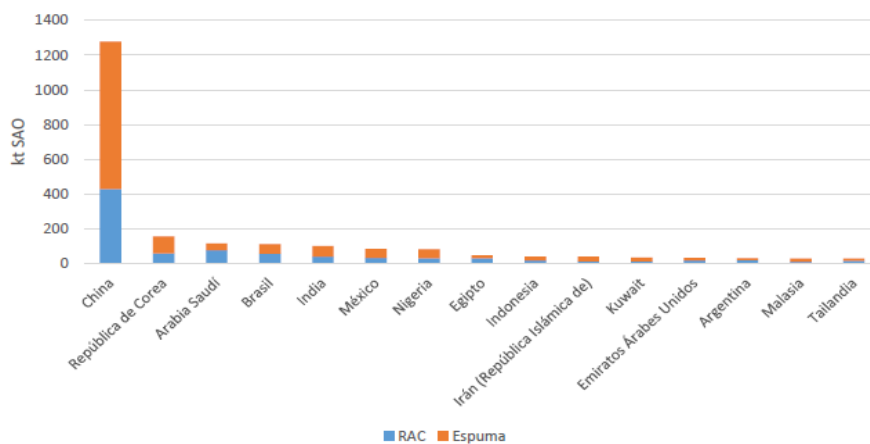
<sup>a</sup> Bancos de HCFC y HFC para países en desarrollo (Artículo 5 del Protocolo de Montreal)

<sup>b</sup> Bancos de HCFC y HFC para países desarrollados (Artículo 2 del Protocolo de Montreal)

Fuente: (GIZ, 2018)

De acuerdo con las estimaciones de GIZ, para el 2014 el país en desarrollo (A5) con mayores bancos de SAO es China, con un banco de alrededor de 1300 kt SAO. Los países de América Latina con los mayores bancos de SAO eran Brasil y México, con bancos estimados entre 50 y 100 kt (Figura 2-4). En comparación, para el año 2015 el banco de SAO estimado para Colombia fue de 16 kt (Figura 2-5).

**Figura 2-4 Países A5 con los mayores bancos de SAO (2014)**



Fuente: (GIZ, 2018)

## 2.4. Bancos de SAO y HFC en Colombia

Para Colombia, la UTO y GIZ estimaron los bancos de SAO para el año 2015, específicamente para los CFC, HCFC y HFC utilizados en los sectores de la refrigeración, el aire acondicionado y las espumas (RAC&F), usando las metodologías explicadas en el numeral 2.2.

### 2.4.1. Bancos de SAO y HFC en Colombia (Enfoque de sustancias)

Para el 2015, los bancos totales de SAO y HFC se estimaron teniendo en cuenta los datos históricos de consumo de estas sustancias. Los bancos de SAO se estimaron en 1261 t de CFC, 15376 t de HCFC y 4977 t de HFC. Para el sector RAC los bancos se estimaron en 5317 t de HCFC y 4977 t de HFC, los CFC ya han desaparecido según este cálculo. El banco de SAO para el sector de espumas se estimó en 1261 toneladas de CFC y 10058 toneladas de HCFC, los HFC no se usan en este sector (UTO & GIZ, 2018).

En la Tabla 2-6 y en la Figura 2-5, se resumen los resultados de la estimación de los bancos de SAO y HFC (totales, potenciales y efectivos) para el año 2015 en Colombia, calculados con el enfoque de sustancias (Top-down).

**Tabla 2-6. Bancos de CFC, HCFC y HFC para Colombia – Enfoque de sustancias (2015)**

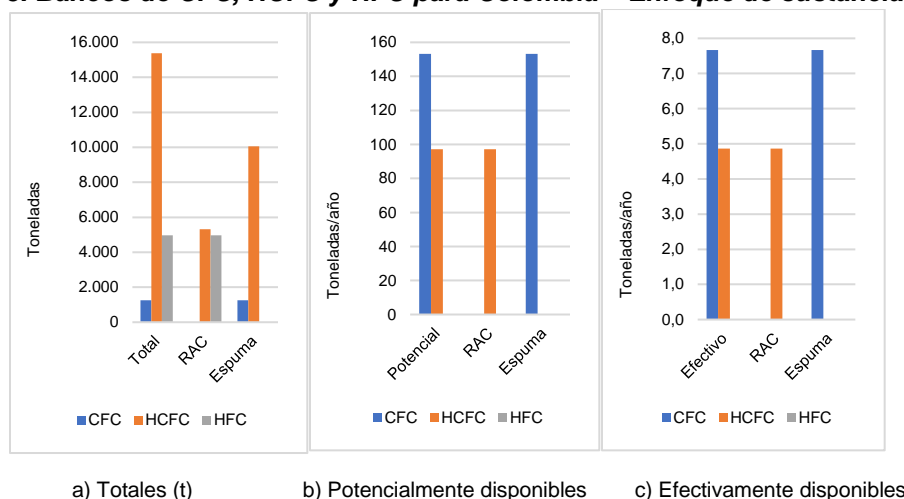
Sustancia	Sector	Totales (t)	Potencialmente disponibles para gestión (t/año)	Efectivamente disponibles para gestión <sup>a</sup> (t/año)
CFC	RAC	0	0	0
CFC	Espumas	1.261	153	7,7
HCFC	RAC	5.317	97	4,9
HCFC	Espumas	10.058	0	0
HFC	RAC	4.977	0	0
HFC	Espumas	0	0	0
<b>Total</b>		<b>21.613</b>	<b>250</b>	<b>12,5</b>

<sup>a</sup> Se aplicó un factor de recuperación del 5% (cantidad de SAO gestionada de forma adecuada en el país para el 2015) para calcular los bancos efectivamente disponibles para gestión.

Fuente: Elaborado a partir de (UTO & GIZ, 2018)

Los bancos de SAO y HFC potencialmente disponibles para su gestión se estimaron en 97 toneladas de HCFC para RAC y 153 toneladas de CFC para espumas. Los agentes espumantes con HCFC aún no estaban disponibles para gestión en el año 2015, ya que este grupo de sustancias se introdujo en el país en el año 2000 (Ver Figura 1-3) y los productos de espuma suelen tener una vida útil de aproximadamente 20 años, por lo que aún no habían entrado en el flujo de residuos (UTO & GIZ, 2018).

**Figura 2-5. Bancos de CFC, HCFC y HFC para Colombia – Enfoque de sustancias (2015)**



Fuente: Elaborado a partir de (UTO & GIZ, 2018)

## 2.4.2. Bancos de SAO y HFC en Colombia (Enfoque de equipos)

El análisis con el enfoque de equipos se realizó partir de dos tipos de datos (UTO & GIZ, 2018):

- Carga de refrigerante por subsector usuario, tomada del inventario de SAO y sustancias alternativas, elaborado por CAEM y la UTO (2017). Estos datos fueron usados para el cálculo de los bancos en los subsectores de refrigeración comercial e industrial.
- Existencias de equipos de RAC, tomadas del inventario de equipos de RAC, elaborado por CAEM y la UTO (2017). Estos datos fueron usados para el cálculo de los bancos en los subsectores de refrigeración doméstica, aire acondicionado estacionario y móvil, chillers y transporte refrigerado.

Como se puede ver en la Tabla 2-7, para el sector RAC, los bancos de SAO y HFC totales se estimaron en 7982 toneladas, de los cuales 301 t corresponden a CFC, 2703 t corresponden a HCFC y 4977 t corresponden a HFC.

**Tabla 2-7. Bancos de CFC, HCFC y HFC para el sector RAC en Colombia - Enfoque de equipos (2015)**

Subsector RAC	Bancos totales (toneladas)			Total
	CFC	HCFC	HFC	
A/C estacionario	2	2245	1292	3539
A/C móvil	23	0	1148	1171
Refrigeración doméstica	23	0	1025	1048
Refrigeración comercial	184	46	1146	1375
Refrigeración industrial	35	412	328	775
Transporte refrigerado	35	0	38	73
<b>Total</b>	<b>301</b>	<b>2703</b>	<b>4977</b>	<b>7982</b>

Fuente: Elaborado a partir de (UTO & GIZ, 2018)

La mayor cantidad de CFC se encuentra los subsectores de refrigeración comercial (184 t), transporte refrigerado (35 t) y refrigeración industrial (35 t). La mayor cantidad de HCFC se encuentra en el sector de aire acondicionado estacionario (2245 t), seguido del sector de

refrigeración industrial (1146 t). Para los HFC los sectores de aire acondicionado estacionario (1292 t), aire acondicionado móvil (1148 t), refrigeración doméstica (1025 t) y refrigeración comercial (1146 t) tienen similar importancia.

Las proyecciones para el año 2030 muestran que el banco de CFC prácticamente desaparecerá (12 t) y el banco de HCFC se reducirá a 873 toneladas, mientras que el banco de HFC aumentará 3,6 veces y llegando casi a 18000 toneladas (Tabla 2-8a y Figura 2-6a).

Para este trabajo, a partir de los bancos de CFC, HCFC y HFC estimados por GIZ y UTO para 2015, se estimaron los bancos de sustancias potencialmente disponibles para su gestión, dividiendo por un tiempo de vida útil de 20 años (valor promedio para los equipos RAC). Estos valores se presentan en la Tabla 2-8b y en la Figura 2-6b.

Los bancos de sustancias efectivamente disponibles para su gestión se estimaron aplicando un factor de recuperación del 5%<sup>10</sup> a la cantidad potencialmente disponible, en un escenario BAU (Tabla 2-8c y Figura 2-6c). De acuerdo con estas estimaciones, para el 2015 estaban efectivamente disponibles para gestión (aprovechamiento o destrucción) 20 toneladas/año de CFC, HCFC y HFC provenientes de equipos de RAC y para 2030 estarían disponibles 47 t/año (7,9 kg/h)<sup>11</sup>.

Por otra parte, en el escenario BAU, para el 2021 se estima una cantidad acumulada de 176 toneladas de SAO y HFC efectivamente disponibles para su gestión, provenientes de equipos de RAC, que alcanzaría un total de 527 toneladas en 2030.

Sin embargo, como se dijo en el capítulo 1, Colombia cuenta con una red de recuperación, reciclaje y aprovechamiento de refrigerantes compuesta por 6 centros de regeneración y 18 centros de recuperación y almacenamiento, por lo que se espera que en los próximos años aumente la cantidad de refrigerante efectivamente gestionado, principalmente R-22, R-134a y mezclas de HFC (R-404A y R-410A).

Se calculó un escenario con un incremento escalonado de la tasa de recuperación de equipos de RAC, con base en algunos escenarios planteados por Minambiente para la recolección de RAEE en Colombia (Tabla 2-9 y Figura 2-7). Con base en este escenario, para el 2030 estarían efectivamente disponibles para gestión (aprovechamiento o destrucción) 265 t/año (44 kg/h) de CFC, HCFC y HFC provenientes de equipos de RAC y un acumulado total de 1305 t, si no se implementara ninguna solución para la destrucción de estas sustancias.

Es interesante observar que en este escenario la cantidad de sustancia efectivamente disponible para disposición se mantiene prácticamente constante para los CFC en un valor cercano a los 200 kg/año, mientras que la cantidad de HCFC aumenta y pasaría de 2,2 a 12,2 t/año en 2030. Para los HFC este escenario demuestra que si aumentamos la tasa de recuperación de los equipos de RAC la cantidad de sustancia efectivamente disponible para disposición podría incrementarse casi en un 500%, teniendo en cuenta que la cantidad de HFC potencialmente disponibles también aumenta.

---

<sup>10</sup> Este valor de 5% corresponde a la tasa de recuperación de SAO proveniente de equipos de RAC, estimada por GIZ para Colombia para el 2015.

<sup>11</sup> Suponiendo un total de 6000 h/año de operación

**Tabla 2-8. Proyección de bancos de CFC, HCFC y HFC para el sector RAC en Colombia BAU**

<b>a) Banco de sustancia (toneladas métricas)</b>																
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
CFC	301,1	253,9	209,6	171,0	137,9	109,5	84,7	63,8	47,4	36,4	29,3	23,3	18,6	15,8	12,5	12,0
HCFC	2736,6	2683,5	2603,6	2543,5	2402,8	2253,6	2144,4	2059,8	1964,5	1798,2	1588,9	1416,2	1258,0	1102,2	980,3	872,7
HFC	4977,2	5733,6	6519,5	7327,1	8109,1	8857,9	9641,7	10437,4	11283,0	12197,8	13038,5	13966,7	14895,6	15904,3	16944,6	17956,9
<b>Total</b>	<b>8015,0</b>	<b>8671,0</b>	<b>9332,7</b>	<b>10041,6</b>	<b>10649,7</b>	<b>11221,1</b>	<b>11870,8</b>	<b>12561,0</b>	<b>13294,9</b>	<b>14032,3</b>	<b>14656,7</b>	<b>15406,2</b>	<b>16172,2</b>	<b>17022,3</b>	<b>17937,4</b>	<b>18841,6</b>

<b>b) Sustancias potencialmente disponibles (toneladas/año)<sup>a</sup></b>																
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
CFC	15,1	12,7	10,5	8,5	6,9	5,5	4,2	3,2	2,4	1,8	1,5	1,2	0,9	0,8	0,6	0,6
HCFC	136,8	134,2	130,2	127,2	120,1	112,7	107,2	103,0	98,2	89,9	79,4	70,8	62,9	55,1	49,0	43,6
HFC	248,9	286,7	326,0	366,4	405,5	442,9	482,1	521,9	564,1	609,9	651,9	698,3	744,8	795,2	847,2	897,8
<b>Total</b>	<b>400,7</b>	<b>433,6</b>	<b>466,6</b>	<b>502,1</b>	<b>532,5</b>	<b>561,1</b>	<b>593,5</b>	<b>628,0</b>	<b>664,7</b>	<b>701,6</b>	<b>732,8</b>	<b>770,3</b>	<b>808,6</b>	<b>851,1</b>	<b>896,9</b>	<b>942,1</b>

<b>c) Sustancias efectivamente disponibles (toneladas/año)<sup>b</sup></b>																
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
CFC	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
HCFC	6,8	6,7	6,5	6,4	6,0	5,6	5,4	5,1	4,9	4,5	4,0	3,5	3,1	2,8	2,5	2,2
HFC	12,4	14,3	16,3	18,3	20,3	22,1	24,1	26,1	28,2	30,5	32,6	34,9	37,2	39,8	42,4	44,9
<b>Total</b>	<b>20,2</b>	<b>21,8</b>	<b>23,5</b>	<b>25,3</b>	<b>26,8</b>	<b>28,2</b>	<b>29,8</b>	<b>31,6</b>	<b>33,4</b>	<b>35,2</b>	<b>36,8</b>	<b>38,7</b>	<b>40,6</b>	<b>42,7</b>	<b>45,0</b>	<b>47,3</b>

<b>Sustancia acumulada (toneladas)</b>	20,2	42,0	65,5	90,8	117,5	145,7	175,6	207,1	240,5	275,7	312,5	351,2	391,8	434,5	479,5	526,7
--	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

<sup>a</sup> El cálculo se realizó usando un tiempo de vida útil promedio de 20 años para los equipos de RAC

<sup>b</sup> Estimación realizada en un escenario BAU, con una tasa de recuperación anual constante de 5% para equipos de RAC.

Fuente: Elaborado a partir de datos de (UTO & GIZ, 2018)

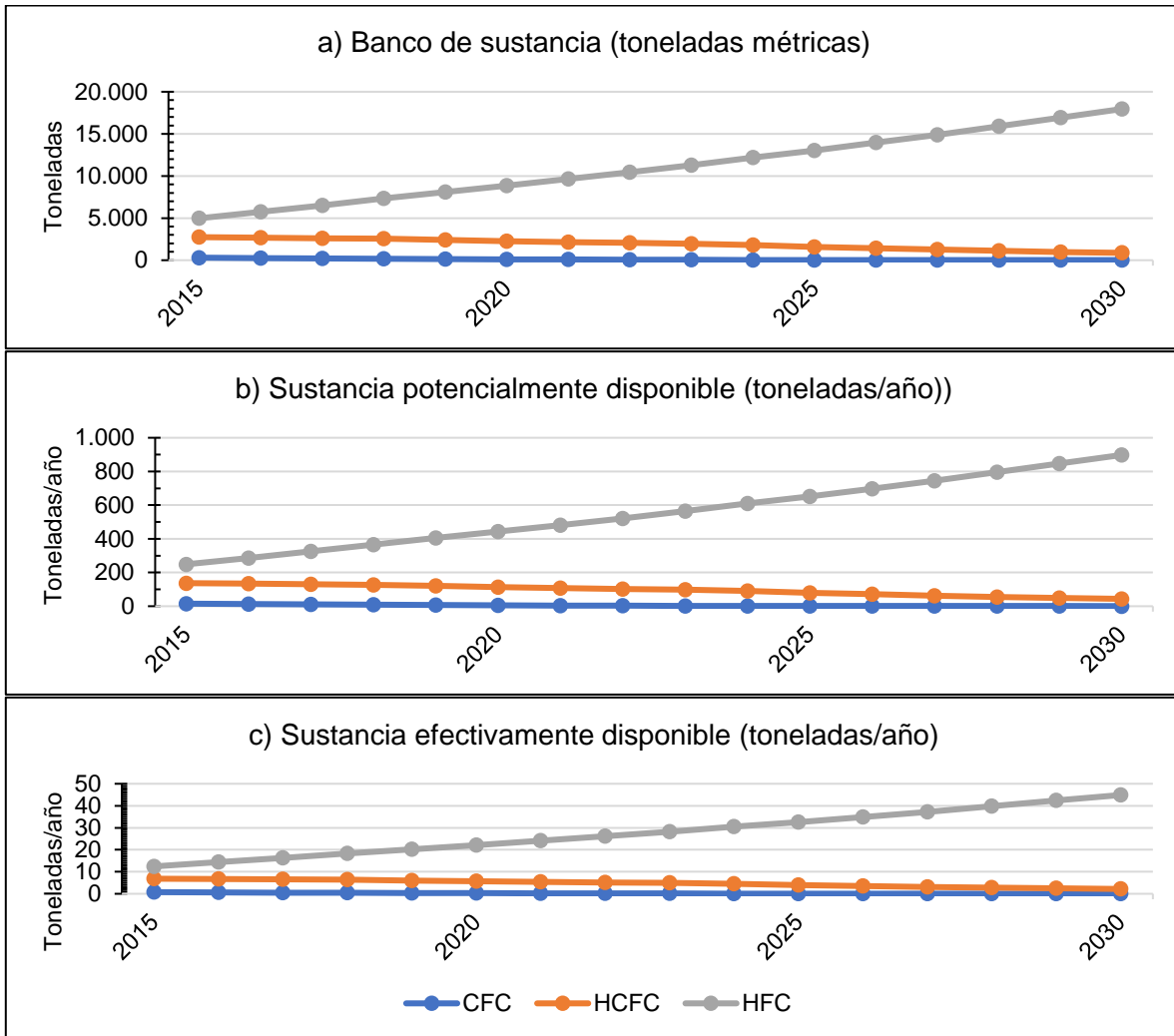
**Tabla 2-9. Proyección de bancos de CFC, HCFC y HFC para el sector RAC en Colombia aumentando la tasa de recuperación de equipos RAC**

	<b>Sustancias efectivamente disponibles (toneladas/año)</b>															
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
% Recuperación <sup>a</sup>	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,5%	6,0%	7,0%	9,0%	11,0%	14,0%	17,0%	20,0%	24,0%	28,0%
CFC	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2
HCFC	6,8	6,7	6,5	6,4	6,0	5,6	5,9	6,2	6,9	8,1	8,7	9,9	10,7	11,0	11,8	12,2
HFC	12,4	14,3	16,3	18,3	20,3	22,1	26,5	31,3	39,5	54,9	71,7	97,8	126,6	159,0	203,3	251,4
<b>TOTAL</b>	<b>20,2</b>	<b>21,8</b>	<b>23,5</b>	<b>25,3</b>	<b>26,8</b>	<b>28,2</b>	<b>32,8</b>	<b>37,9</b>	<b>46,7</b>	<b>63,4</b>	<b>80,9</b>	<b>108,3</b>	<b>138,0</b>	<b>170,8</b>	<b>216,0</b>	<b>264,6</b>
<b>Sustancia acumulada (toneladas)</b>	<b>20,2</b>	<b>42,0</b>	<b>65,5</b>	<b>90,8</b>	<b>117,5</b>	<b>145,7</b>	<b>178,5</b>	<b>216,4</b>	<b>263,1</b>	<b>326,6</b>	<b>407,5</b>	<b>515,8</b>	<b>653,7</b>	<b>824,6</b>	<b>1040,5</b>	<b>1305,2</b>

<sup>a</sup> La tasa de recuperación anual se varió con base en algunos escenarios planteados por Minambiente para la recolección de RAEE en Colombia.

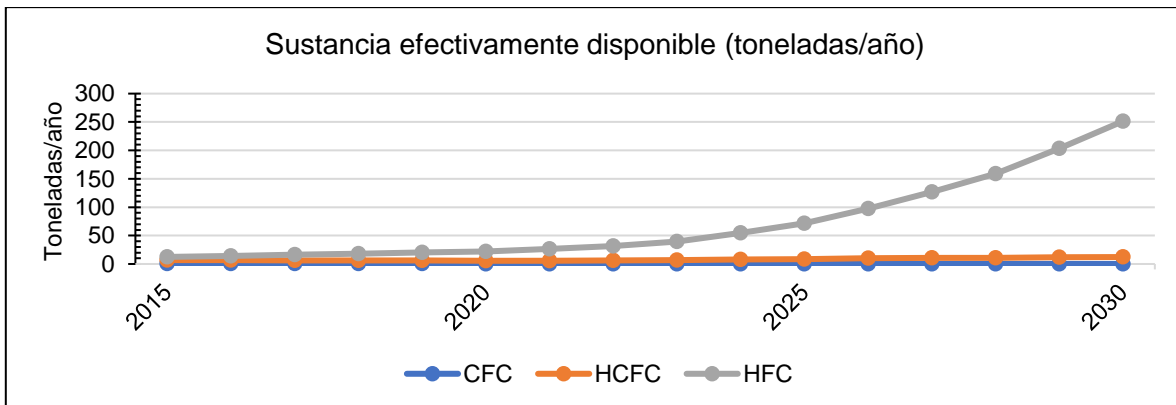
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 2-6 Proyección de bancos de CFC, HCFC y HFC para el sector RAC en Colombia BAU**



Fuente: Elaborado a partir de datos de (UTO & GIZ, 2018)

**Figura 2-7 Proyección de bancos de CFC, HCFC y HFC aumentando la tasa de recuperación de equipos RAC**



Fuente: Elaboración propia

### **3. ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE DESTRUCCIÓN DE LAS SAO Y HFC**

Las tecnologías para la destrucción de SAO y HFC pueden ser multipropósito o especializadas.

Las instalaciones multipropósito desarrollan otras actividades además de destruir SAO y HFC, entre ellas se encuentran los hornos cementeros, rotatorios y de incineración de residuos, entre otros. Este tipo de instalaciones ya existen en la mayoría de los países y se usan para el tratamiento de diferentes tipos de residuos, sin embargo, para la eliminación de SAO y HFC deben hacerse adaptaciones importantes, relacionadas principalmente con el sistema de alimentación de los residuos y con el control de las emisiones.

Las tecnologías especializadas son normalmente más costosas, debido a que han sido desarrolladas para atender específicamente la destrucción de SAO y HFC, entre estas tecnologías se incluyen el arco de plasma, los reactores de vapor sobrecalentado y la deshalogenación catalítica, entre otras.

En este capítulo se presenta el estado del arte de la implementación de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC a nivel mundial y en Colombia. Se incluye una revisión de tecnologías evaluadas y aprobadas por el Protocolo de Montreal, así como una revisión de otras tecnologías con potencial para destruir estas sustancias. Asimismo, una revisión del estado actual de la implementación de las tecnologías en Colombia y una estimación de la capacidad requerida para la destrucción de SAO en el país. Por último, se incluye un análisis de las barreras para la implementación de estas tecnologías en Colombia.

#### **3.1. Criterios de referencia para la evaluación y selección de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC**

De acuerdo con el Protocolo de Montreal, *“un proceso de destrucción es aquel que, cuando se aplica a las sustancias controladas, se traduce en la transformación permanente o la descomposición de la totalidad de esas sustancias o de una parte considerable de éstas”* (PNUMA, 2019, p. 104).

En el 2002, el Grupo de evaluación tecnológica y económica del Protocolo de Montreal (TEAP, por sus siglas en inglés) estableció los criterios de referencia de desempeño técnico para la evaluación y selección de las tecnologías de destrucción de SAO, considerando los posibles impactos en la salud humana y el medio ambiente.

Los criterios desempeño técnico incluyen la eficiencia mínima de destrucción y remoción (DRE, por sus siglas en inglés) y la emisión máxima recomendada de contaminantes a la atmósfera, como se muestra en la Tabla 3-1.

**Tabla 3-1. Criterios de referencia de desempeño técnico para tecnologías de destrucción de SAO**

Eficiencia / Emisión		Unidades <sup>a</sup>	Fuentes diluidas	Fuentes concentradas
Eficiencia de destrucción y remoción <sup>b</sup>	DRE	%	95	99,99
Emisión de dioxinas y furanos	PCDD/PCDF <sup>c</sup>	ng-ITEQ/Nm <sup>3</sup>	0,5	0,2 <sup>d</sup>
Emisión de otros contaminantes	HCl/Cl <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	100	100
	HF	mg/Nm <sup>3</sup>	5	5
	HBr/Br <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	5	5
	Material particulado (PST) <sup>e</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	50	50
	CO	mg/Nm <sup>3</sup>	100	100

<sup>a</sup> Los límites de emisión se expresan como unidad de masa por metro cúbico seco de gases de escape a 0°C y 101,3 kPa, corregidos a 11% de O<sub>2</sub> (metro cúbico normalizado, Nm<sup>3</sup>).

<sup>b</sup> La definición de la eficiencia de destrucción se refiere a las entradas y salidas del proceso de destrucción mismo, y no a la instalación de destrucción en su conjunto.

<sup>c</sup> ITEQ: Equivalente Tóxico Internacional

<sup>d</sup> El Convenio de Basilea, en sus directrices aplicables a los COP en el marco del Convenio de Estocolmo, exige un límite de emisión de 0,1 ng-ITEQ/Nm<sup>3</sup> para las PCDD/F (UNEP, 2018a).

<sup>e</sup> PST: Partículas suspendidas totales

Fuente: (UNEP, 2002)

### 3.1.1. Eficiencia de destrucción y remoción (DRE)

La DRE se determina restando de la masa de una sustancia química introducida en un sistema de destrucción durante un período de tiempo determinado, la masa de esa sustancia química que se libera en los gases de chimenea y expresando esa diferencia como un porcentaje de la masa de la sustancia química introducida en el sistema como se muestra en la Ecuación 5 (UNEP, 2018a, p. 1).

$$DRE = \frac{N_1^{in} - \sum_i N_i^{out}}{N_1^{in}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$N_1^{in}$  = número de moles de SAO alimentadas al sistema de destrucción

$N_i^{out}$  = número de moles de SAO del tipo  $i$  que se liberan en los gases de chimenea

### 3.1.2. Emisiones de dioxinas y furanos

En todos los procesos para destruir las SAO con alta temperatura es posible la formación de dioxinas y furanos como subproductos no intencionales, debido a la combustión incompleta. Estas sustancias son contaminantes orgánicos persistentes (COP) con un elevado potencial tóxico.

En la destrucción de las sustancias cloradas se pueden producir dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD, por sus siglas en inglés) y dibenzofuranos policlorados (PCDF, por sus siglas en inglés).

### **3.1.3. Emisiones de gases ácidos, material particulado y monóxido de carbono**

El TEAP estableció también las concentraciones máximas de emisiones de gases ácidos (HCl, HF y HBr), material particulado (PST) y monóxido de carbono (CO) que pueden ser alcanzadas en los gases de chimenea de las diferentes tecnologías de destrucción de SAO, asegurando la protección adecuada de la salud humana y el ambiente. Estas concentraciones se aplican a la destrucción tanto de las fuentes diluidas (espumas poliméricas) como de las fuentes concentradas de SAO.

El monóxido de carbono se libera generalmente como resultado de la combustión incompleta durante el proceso de destrucción de SAO y por lo tanto es una buena medida del control del proceso de destrucción (UNEP, 2002).

### **3.1.4. Capacidad técnica**

Las tecnologías de destrucción también deben satisfacer los criterios de capacidad técnica, que indican hasta qué punto se ha demostrado que la tecnología puede eliminar las SAO, o una sustancia orgánica halogenada recalcitrante<sup>12</sup> comparable, como los policlorobifenilos (PCB), de manera efectiva y a escala comercial. Se considera que una tecnología satisface la capacidad técnica si cumple con los siguientes criterios (UNEP, 2002):

- a) se ha demostrado que ha destruido SAO al menos a escala piloto o de demostración; o
- b) se ha demostrado que se ha destruido una sustancia orgánica clorada refractaria que no sea SAO, cumpliendo con los criterios de rendimiento técnico, al menos a escala piloto o de demostración, lo que indica que se considera que la tecnología tiene un alto potencial para destrucción de SAO, pero no se ha demostrado realmente con SAO; y
- c) la capacidad de procesamiento de la planta piloto o de demostración no debe ser inferior a 1,0 kg/h de la sustancia a destruir, ya sea SAO o un sustituto adecuado.

Para la destrucción de los HFC, se considera que una tecnología satisface la capacidad técnica si cumple con alguno de los siguientes criterios (UNEP, 2018a):

- a) es una tecnología aprobada de oxidación térmica o arco de plasma, que ha demostrado que cumple con los criterios de emisión de partículas y dioxinas/furanos para la destrucción de SAO, y se ha demostrado que ha destruido HFC de acuerdo con los

---

<sup>12</sup> Sustancias que tienden a permanecer por mayor tiempo en el ambiente. No son biodegradables bajo condiciones ambientales naturales.

- criterios de desempeño técnico para DRE, HF y CO, al menos a escala piloto o de demostración; o
- b) es una tecnología aprobada de conversión (o no incineración) de SAO, o una tecnología de destrucción desarrollada específicamente para los HFC, que se ha demostrado que ha destruido los HFC de acuerdo con los criterios técnicos de desempeño para DRE, HF, CO, material particulado y dioxinas/furanos, al menos a escala piloto o de demostración; o
  - c) es una tecnología aprobada de destrucción de SAO, pero no se ha demostrado realmente que haya destruido los HFC según los criterios de rendimiento técnico, al menos a escala piloto o de demostración (recomendada como de alto potencial); o
  - d) se ha demostrado que ha destruido un compuesto orgánico halogenado refractario, en forma gaseosa o líquida, que no sea una SAO o HFC, según los criterios técnicos de rendimiento, al menos a escala piloto o de demostración, pero no se ha demostrado realmente con los HFC.

Adicionalmente, el mayor contenido de flúor de los HFC puede afectar la operatividad, la productividad y/o el rendimiento de una tecnología, y puede ser necesario hacer ajustes en las tecnologías de destrucción de SAO aprobadas para procesar los HFC (UNEP, 2018a).

### **3.2. Tecnologías aprobadas por el Protocolo de Montreal para la destrucción de SAO y HFC**

Se presenta una revisión de las tecnologías para la destrucción de SAO y HFC recomendadas por el TEAP del Protocolo de Montreal, incluidas las fuentes diluidas y concentradas, agrupadas en tres categorías: oxidación térmica (incineración), arco de plasma y conversión (no incineración), las cuales se resumen en la Tabla 3-2.

En 2018, el TEAP realizó una evaluación técnica de la aplicabilidad de las tecnologías de destrucción aprobadas por el Protocolo de Montreal a los HFC. De acuerdo con esta evaluación, las tecnologías de incineración y arco de plasma usadas para destrucción de SAO que ya han cumplido con los criterios de desempeño técnico para la no generación de dioxinas y furanos, así como la reducción de emisiones de material particulado (Tabla 3-1), son capaces de cumplir los mismos criterios de rendimiento cuando se utilizan para la destrucción de HFC.

En el Anexo A, se incluye una tabla resumen del desempeño técnico y ambiental, así como costos estimados para las tecnologías de destrucción de SAO y HFC incluidas en la Tabla 3-2, con datos recopilados de doce fuentes de información diferentes.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de las tecnologías aprobadas por el Protocolo de Montreal para la destrucción de SAO. Para cada tecnología se incluyen comentarios sobre el potencial de destrucción de HFC, de acuerdo con la bibliografía revisada.

**Tabla 3-2. Tecnologías para la destrucción de SAO y HFC<sup>a</sup> aprobadas por el Protocolo de Montreal**

Tecnología	Fuentes concentradas			Fuentes diluidas		
	CFC, HCFC, CCl <sub>4</sub> , TCA	Halones	HFC	SAO	HFC	
<b>Eficiencia de destrucción y remoción (DRE)</b>	99.99%	99.99%	99.99%	95%		
Oxidación térmica (Incineración)	Horno cementero <sup>b</sup>	Aprobada	No aprobada <sup>c</sup>	Alto potencial <sup>f</sup>	No aplicable <sup>d</sup>	
	Oxidación gases/humos	Aprobada	No determinada <sup>e</sup>	Recomendada para aprobación <sup>f</sup>	No aplicable	
	Incineración de inyección líquida	Aprobada	Aprobada	Alto potencial <sup>f</sup>	No aplicable	
	Incineración de residuos sólidos municipales <sup>b</sup>				Aprobada	Alto potencial <sup>g</sup>
	Reactor térmico poroso	Aprobada	No determinada	Recomendada para aprobación <sup>f</sup>	No aplicable	
	Reactor de craqueo	Aprobada	No aprobada	Alto potencial <sup>f</sup>	No aplicable	
	Incineración en horno rotatorio <sup>b</sup>	Aprobada	Aprobada	Alto potencial <sup>f</sup>	Aprobada	
Plasma	Arco de plasma de argón	Aprobada	Aprobada	Alto potencial <sup>f</sup>	No aplicable	
	Plasma de radiofrecuencia de acoplamiento inductivo	Aprobada	Aprobada	No evaluada	No aplicable	
	Plasma de microondas	Aprobada	No determinada	No evaluada	No aplicable	
	Arco de plasma de nitrógeno	Aprobada	No determinada	Alto potencial <sup>f</sup>	No aplicable	
Conversión (no incineración)	Reacción química con H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub>	Aprobada	Aprobada	Alto potencial <sup>f</sup>	No aplicable	
	Deshidrogenación catalítica en fase gaseosa	Aprobada	No determinada	Alto potencial <sup>f</sup>	No aplicable	
	Reactor de vapor sobrecalentado	Aprobada	No determinada	Alto potencial <sup>f</sup>	No aplicable	
	Reacción Térmica con Metano	Aprobada	Aprobada	No evaluada	No aplicable	

Fuente: Adaptado de (ICF, 2018; UNEP, 2018a)

<sup>a</sup> Las tecnologías para la destrucción de HFC se encuentran en revisión y discusión por parte del TEAP

<sup>b</sup> Tecnologías multipropósito

<sup>c</sup> No aprobada, indica que la tecnología se revisó y no cumplió con las recomendaciones del TEAP para el proceso.

<sup>d</sup> No aplicable, indica que la tecnología no es factible para el proceso.

<sup>e</sup> No determinada, indica que la tecnología no se revisó para la destrucción de ese compuesto.

<sup>f</sup> Incluyendo el HFC-23, de acuerdo con el informe del TEAP (2018)

<sup>g</sup> Excepto para el HFC-23, de acuerdo con el informe del TEAP (2018)

### 3.2.1. Tecnologías de incineración

La incineración es un proceso usado para el tratamiento de residuos que consiste en la combustión de sustancias orgánicas contenidas en materiales de desecho. La incineración convierte los desechos en cenizas, formadas principalmente por los componentes inorgánicos; gases de combustión, que deben limpiarse de contaminantes gaseosos y particulados antes de que se dispersen en la atmósfera; y calor (Knox, 2005).

Se han desarrollado tecnologías para la incineración exclusiva de las SAO y HFC, así como para la co-incineración junto con otros desechos y para la incineración en procesos de fabricación (p. ej., hornos cementeros), aunque la mayoría de las SAO y HFC tienen un valor insignificante como combustible y un alto contenido de halógenos (asociados a la corrosión y a las emisiones a la atmósfera).

El material de construcción del equipo utilizado en las instalaciones de incineración debe ser compatible con el HCl y el HF, que se pueden formar en los gases de escape a causa de la destrucción de las SAO y los HFC, a fin de evitar un tiempo de inactividad excesivo por mantenimiento (UNEP, 2018a).

Respecto a la formación de PCDD/F en los procesos de incineración, la formación de estas sustancias tóxicas se produce principalmente a través de reacciones homogéneas en fase gaseosa a temperaturas entre 773 K (500 °C) y 1073 K (800 °C) a partir de precursores clorados y a través de reacciones heterogéneas donde el proceso principal es el efecto catalítico de la superficie de las cenizas volantes en la zona de postcombustión a temperaturas entre 473 K (200 °C) y 673 K (400 °C) (Mukherjee et al., 2016).

Sin embargo, existen diferentes opciones para reducir la formación de dioxinas y furanos en la incineración de residuos. Mukherjee et al. (2016) realizaron una revisión de diferentes tecnologías, encontrando que una solución combinada entre la aplicación de buenas prácticas de combustión para lograr la combustión completa y reducir la formación de PCDD/F, acompañada de un tratamiento a final de tubo y la instalación de un dispositivo de control automatizado, no solo mejora la eficiencia del proceso desde el punto de vista operativo, sino también desde el punto de vista económico. Las buenas prácticas incluyen controlar la temperatura de combustión (1123 – 1273 K) y el tiempo de residencia, así como el uso de un limitado exceso de oxígeno entre el 1 y el 3% (v/v) y suficiente turbulencia en la cámara de combustión, por último, la temperatura de postcombustión debe mantenerse en 473 K (200 °C) para lograr un rápido enfriamiento de los gases de combustión para mitigar la formación de dioxinas. El tratamiento a final de tubo consiste en incluir una serie de operaciones como un lavador húmedo y un filtro de mangas con inyección de carbón activado o la instalación de un sistema de adsorción de lecho fijo para eliminar las dioxinas.

#### a) Horno cementero

Los hornos cementeros son cilindros giratorios inclinados y revestidos con ladrillos resistentes al calor. Funcionan en una configuración a contracorriente, la materia prima se alimenta en el extremo más frío del horno y cae hacia el extremo caliente para formar el clínker, mientras que los gases de combustión ingresan en el extremo caliente y fluyen hacia arriba, calentando las materias primas a medida que fluyen hacia el extremo superior frío. Luego, los gases pasan a través de un dispositivo de control de la contaminación (filtros

de mangas o un precipitador electrostático) que elimina las partículas y otros contaminantes de los gases, antes de que se emitan a la atmósfera (UNEP, 2002).

Debido a la temperatura del horno (hasta 1500°C) y los tiempos de residencia (hasta 10 segundos), los hornos cementeros pueden destruir la mayoría de los compuestos orgánicos, incluidos los PCB, SAO y HFC. La naturaleza alcalina de la materia prima neutraliza los gases ácidos formados por la destrucción de SAO y HFC.

Los hornos cementeros tienen una gran capacidad para la destrucción de SAO y HFC, sin embargo, esta capacidad está limitada por la tolerancia de los productos del proceso primario al contenido de cloro y flúor en la alimentación, dados los posibles efectos negativos en la calidad del producto. El contenido máximo de flúor permitido es aproximadamente el 0,25 % y el límite teórico de cloro es aproximadamente el 0,015 %, de la alimentación de materia prima (UNEP, 2002).

Existen reportes de uso de hornos de cemento para la destrucción de HFC en algunos países, con capacidades en el rango de 10-50 kg/h, pero no se han registrado valores reales de DRE ni de emisiones de contaminantes. Sin embargo, los hornos de cemento equipados con una infraestructura de alimentación adecuada y una tecnología de control de la contaminación atmosférica probablemente serían capaces de destruir HFC cumpliendo con los criterios de rendimiento (UNEP, 2018a).

La principal ventaja de esta tecnología es que utiliza una instalación existente, por lo que se elimina la inversión inicial. La principal desventaja es la emisión de contaminantes atmosféricos (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y MP), así como la posible emisión de PCDD/F, sin embargo, la optimización del proceso de combustión y la introducción de dispositivos de control disminuyen considerablemente las emisiones de los hornos cementeros. La presencia de cal o caliza inhibe la formación de dioxinas y furanos, estos materiales también son absorbentes de estos contaminantes.

Adicionalmente, la configuración a contracorriente de los hornos permite al proceso contar con varios posibles puntos de entrada de diferentes residuos a incinerar a varias temperaturas, lo que se traduce en versatilidad del equipo para la destrucción de una amplia gama de residuos.

#### **b) Oxidación de gases/humos**

Los incineradores de gases/humos están diseñados para un funcionamiento continuo, con temperaturas entre 1000 y 1250°C y tiempos de residencia de 1 a 2 segundos. Estos incineradores utilizan una cámara de combustión revestida de material refractario y la corriente de humos es calentada por un combustible externo como el gas natural o el fuel-oil (UNEP, 2002). La mayoría de los incineradores de gases/humos están asociados con plantas de producción de fluoro químicos que no ofrecen servicios de destrucción a entidades externas (ICF, 2018).

#### **c) Incineración de inyección líquida**

Los incineradores de inyección líquida suelen ser unidades de una sola cámara con uno o más quemadores en los que se inyectan los desechos líquidos, que se atomizan en gotas finas y se queman en suspensión. La coacción tangencial se usa frecuentemente para promover la mezcla turbulenta. Pueden surgir problemas de estabilidad de la llama cuando

se inyectan en el quemador volúmenes superiores al 40% de CFC u otras SAO (UNEP, 2002).

Estos incineradores suelen utilizarse para destruir desechos como las SAO, los aceites, los disolventes y las aguas residuales en los lugares de fabricación (ICF, 2018).

#### **d) Incineración de residuos sólidos municipales**

Este proceso emplea rejillas móviles para la destrucción de materiales sólidos, incluidas las espumas que contienen SAO. Los residuos se depositan en una fosa y luego se transfieren mecánicamente a un contenedor que alimenta los desechos de manera controlada a la rejilla móvil que se mueve a través de la zona de combustión. El aire de combustión se extrae a través de la fosa de desechos para controlar el olor, se precalienta y se introduce en la zona de combustión a través de la rejilla móvil (UNEP, 2002).

Los gases de combustión suelen enfriarse en una caldera de calor residual y, posteriormente, limpiarse mediante un secador por aspersion y un filtro de mangas, o mediante un precipitador electrostático seco. Para obtener bajas emisiones de dioxinas y furanos, los sistemas avanzados de control de la contaminación del aire utilizan depuradores de secado por aspersion con inyección de carbón activado, seguidos de filtros de mangas (UNEP, 2002).

#### **e) Reactor térmico poroso**

Los reactores porosos son sistemas de alta temperatura con una capa porosa que facilita la descomposición de las SAO y otros gases residuales industriales. La destrucción tiene lugar en una atmósfera oxidante con un suministro continuo de un gas auxiliar. La transferencia de calor apropiada es crítica para la función apropiada del reactor. La estructura sólida y la capa porosa aseguran que el calor se distribuya uniformemente y reduce el volumen de la unidad (ICF, 2018).

Esta tecnología ofrece alta eficiencia energética, bajos requerimientos de energía y la posibilidad de un diseño compacto y operación por lotes. Estos reactores son diseñados específicamente para la destrucción de SAO/HFC por lo que utilizan materiales resistentes a la corrosión (grafito). Los residuos de HCl y HF pueden ser recuperados como ácidos grado industrial para uso comercial (UNEP, 2018a).

#### **f) Reactor de craqueo**

El proceso utiliza un reactor cilíndrico refrigerado por agua hecho de grafito y un sistema de quemador de oxígeno e hidrógeno (UNEP, 2002).

Los CFC y HCFC se descomponen en HF, H<sub>2</sub>O, HCl, CO<sub>2</sub> y Cl<sub>2</sub> a 2000 °C. Una vez que los productos se descomponen, se mueven al absorbedor para su enfriamiento. El proceso da como resultado gases residuales que consisten principalmente en CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, vapor de agua, así como HF y HCl de calidad técnica. El proceso de craqueo produce pocas emisiones, ya que el hidrógeno y el oxígeno se utilizan como combustible y oxidante, lo que reduce el volumen de gases de combustión (ICF, 2018; UNEP, 2002).

### g) Incineración en horno rotatorio

Los hornos rotatorios utilizan un cilindro giratorio para destruir los desechos peligrosos (gases, líquidos, sólidos, incluso lodos). Los desechos líquidos, como los CFC, los halones y otras SAO pueden introducirse en el horno rotatorio o directamente en el dispositivo de poscombustión (UNEP, 2002).

La mayoría de los hornos rotatorios están equipados con un dispositivo de poscombustión, que utiliza temperaturas alrededor de 1000 °C, para garantizar la descomposición de todos los gases de escape (ICF, 2018; UNEP, 2002).

Sus permisos de operación generalmente restringen la cantidad de desechos que contienen cloro. El HF podría atacar el incinerador, por lo que la fracción de flúor en la alimentación está limitada típicamente en el rango del 1%, esto generalmente establece la capacidad de incineración de SAO (UNEP, 2002).

En la Tabla 3-3 se resumen las principales ventajas y desventajas de las tecnologías de incineración aprobadas por el Protocolo de Montreal para la destrucción de SAO.

**Tabla 3-3. Ventajas y desventajas de las tecnologías de oxidación térmica (incineración)**

<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Oxidación térmica (Incineración)</b>		
Horno cementero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existen más de 2500 plantas de producción de cemento en el mundo (sin incluir China) que pueden ser usadas para la destrucción de SAO.</li> <li>• Es una tecnología multipropósito, se usa a nivel mundial para coprocesamiento e incineración de diversos residuos peligrosos (bajo condiciones controladas y con límites en la alimentación).</li> <li>• Las modificaciones de los hornos son relativamente fáciles y de bajo costo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es necesario controlar cuidadosamente las tasas de alimentación de flúor y cloro e imponer un límite de capacidad de destrucción al horno.</li> <li>• Las modificaciones necesarias incluyen equipos para alimentar las SAO de forma controlada y supervisar las emisiones peligrosas</li> </ul>
Oxidación de gases/humos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El proceso está bien establecido y puede aplicarse tanto a los residuos de CFC como a los de halones.</li> <li>• Se consiguen altas DRE y bajas emisiones debido a las altas temperaturas y a la buena mezcla.</li> <li>• La emisión masiva de contaminantes es mucho más baja que en los incineradores que destruyen SAO junto con otros residuos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La mayoría de los incineradores de gases/humos están asociados a plantas de producción de fluoro químicos que no ofrecen servicios de destrucción a entidades externas.</li> </ul>
Incineración de inyección líquida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnología consolidada, con un historial probado de destrucción de SAO.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La tecnología está diseñada principalmente para la destrucción de residuos líquidos, aunque es posible que el sistema de alimentación pueda modificarse para manejar gases licuados.</li> <li>• Tasa relativamente alta de emisiones de contaminantes dada la baja tasa de destrucción de SAO.</li> </ul>
Incineración de residuos sólidos municipales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esta es la única tecnología que se utiliza actualmente para la destrucción de espumas que contienen SAO.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La emisión en masa de contaminantes, especialmente PCDD/F y HCl, es muy elevada debido a los altos volúmenes de gases generados, sobre todo si se</li> </ul>

<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su disponibilidad es bastante amplia, aunque la incineración de residuos sólidos municipales no se practica en la mayoría de los países en desarrollo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tiene en cuenta el bajo nivel de destrucción de SAO.</li> </ul>
Reactor térmico poroso	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los residuos de HCl y HF pueden ser recuperados como ácidos grado industrial para uso comercial.</li> <li>• Alta eficiencia energética, bajos requerimientos de energía, operación por lotes, diseño compacto.</li> <li>• Son diseñados específicamente para la destrucción de SAO/HFC por lo que utilizan materiales resistentes a la corrosión (grafito).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango limitado de aplicación.</li> </ul>
Reactor de craqueo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnología consolidada, ha estado funcionando a gran escala comercial durante muchos años.</li> <li>• La alta temperatura de funcionamiento consigue altos niveles de DRE y el enfriamiento rápido minimiza la formación de PCDD/F.</li> <li>• Produce pocas emisiones. Los gases residuales consisten principalmente en CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, y vapor de agua. El uso de una llama de oxígeno-hidrógeno limita la formación de NO<sub>x</sub>.</li> <li>• El proceso permite la recuperación de HF y HCl de calidad técnica, lo que minimiza la liberación de sales de haluro al medio ambiente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de una fuente económica de hidrógeno in situ.</li> <li>• La recuperación de HCl y HF puede no ser tan práctica si la instalación de destrucción no está situada en una fábrica de fluorocarburos.</li> <li>• El proceso es bastante complejo y puede no ser práctico o económico aplicar este proceso a una escala significativamente menor.</li> <li>• El proceso requiere un tratamiento previo de los residuos de CFC para eliminar el aceite.</li> <li>• El proceso no tolera las SAO que contienen bromo.</li> </ul>
Incineración en horno rotatorio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnología demostrada ampliamente a nivel mundial para destrucción de SAO y HFC.</li> <li>• Tecnología multipropósito, capacidad para manejar una amplia variedad de residuos líquidos y sólidos.</li> <li>• Puede manejar tanto espumas como fuentes concentradas.</li> <li>• Aunque la capacidad para alimentar CFC está limitada por el contenido de flúor, la capacidad resultante sigue siendo bastante elevada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La construcción es muy costosa.</li> <li>• Los costos de mantenimiento son elevados.</li> <li>• Algunos hornos informaron de niveles de PCDD/F superiores a 0,3 ng/m<sup>3</sup>, lo que satisface el límite de detección para las espumas, pero no para las fuentes concentradas.</li> <li>• Permite máximo 1% del total de la alimentación como flúor.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2. Tecnologías de arco de plasma

La destrucción por arco de plasma se produce generalmente por pirólisis en un ambiente de oxígeno reducido y a temperaturas significativamente más altas que la oxidación térmica. Las tecnologías se diferencian entre sí por el tipo de gases inertes empleados, el método de generación de calor para crear el plasma y el diseño del recipiente de contención del proceso (UENP, 2018a).

Es un proceso térmico extremo que utiliza altas temperaturas en un ambiente de oxígeno reducido para convertir la materia orgánica en un gas de síntesis, que se compone

principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono, con escoria como subproducto. Las aplicaciones de tratamiento de desechos aprovechan la capacidad del plasma para iniciar rápidamente una variedad de reacciones químicas que incluyen descomposición, evaporación, pirólisis y oxidación (Moustakas et al., 2005).

Para destruir las SAO, se crea un arco de plasma a partir de la descarga de una gran corriente eléctrica entre un cátodo y un ánodo separados o en un campo magnético mientras hay un gas inerte presente. La destrucción se produce cuando la sustancia en estado gaseoso pasa a través del arco de plasma (4700 a 19700 °C) y se ioniza (se descompone en su estructura molecular básica) (ICF, 2018).

Las unidades de destrucción por plasma están diseñadas para ser relativamente pequeñas, compactas y transportables. Estos equipos consumen una gran cantidad de energía para generar el plasma, pero tienden a tener eficiencias de destrucción muy altas y bajas emisiones de gases (ICF, 2018).

La vitrificación se ha utilizado como un proceso complementario, en combinación con las tecnologías de arco de plasma, para tratar los subproductos de la destrucción de compuestos orgánicos halogenados (UNEP, 2002).

#### **a) Arco de plasma de argón**

Esta tecnología utiliza la antorcha patentada PLASCON™ para crear un arco de plasma de 10000 °C en presencia de argón para destruir las SAO (ICF, 2018).

Las SAO se calientan rápidamente a aproximadamente 2500 °C en la cámara de reacción, donde ocurre la pirólisis. Se agrega vapor, junto con los residuos, en el colector de inyección; el oxígeno garantiza que cualquier carbono formado durante la pirólisis se convierta en dióxido de carbono y el hidrógeno evita la formación de CF<sub>4</sub> (potente GEI). La pirólisis es seguida por un rápido enfriamiento alcalino de aproximadamente 1200 °C a menos de 100 °C, lo que limita la formación de dioxinas y furanos. El gas frío se lava con un líquido alcalino en una columna empaquetada a contracorriente para neutralizar el HCl y otros gases ácidos (UNEP, 2002).

Los subproductos sólidos y líquidos finales del proceso son las sales de haluro y el agua, que pueden liberarse en el sistema de alcantarillado municipal. Los subproductos gaseosos finales incluyen CO<sub>2</sub>, argón y cantidades traza de otros gases, que se liberan a la atmósfera (ICF, 2018).

#### **b) Plasma de radiofrecuencia de acoplamiento inductivo (ICRF)**

La tecnología de plasma ICRF utiliza un arco de plasma de 10000 °C creado con un soplete de radiofrecuencia acoplado inductivamente para destruir las SAO. La SAO gaseosa y el vapor se colocan en la unidad de destrucción a través de la antorcha de plasma, se calientan y luego se trasladan a una cámara del reactor donde se descomponen los gases. Los gases entran directamente en el reactor de destrucción, donde se mantienen a unos 2000 °C durante cerca de dos segundos (ICF, 2018; UNEP, 2002).

Los dispositivos de plasma acoplados inductivamente utilizan la radiofrecuencia para producir plasma, por lo que eliminan la necesidad de electrodos o la necesidad de

enfriamiento. Los gases de salida se limpian con una solución cáustica para eliminar los gases ácidos (ICF, 2018).

### c) Plasma de microondas

En este proceso, una mezcla de CFC con vapor de agua se introduce en el plasma y se descompone a temperaturas superiores a 6000 K ( $\approx 5700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), formando HCl, HF, CO y CO<sub>2</sub>. Los gases ácidos se lavan en una torre con una lechada de cal apagada y luego el gas del proceso se quema con aire para convertir el CO en CO<sub>2</sub> (UNEP, 2002).

Hay dos tipos de gasificadores de plasma por microondas: el sistema basado en plasmatrón y el sistema de inyección directa. El plasmatrón es una antorcha accionada por microondas y el sistema de inyección directa es un proceso en el que las microondas se inyectan en un área pequeña dentro de una cámara de reacción (ICF, 2018).

### d) Arco de plasma de nitrógeno

Esta tecnología utiliza el plasma de nitrógeno creado por una antorcha de plasma de corriente alterna no transferida, que funciona con electrodos enfriados por agua para descomponer los fluorocarbonos licuados en CO, HF y HCl. Los gases licuados se pueden alimentar directamente desde su almacenamiento presurizado al reactor, mientras que los líquidos (por ejemplo, CFC-11) se transfieren primero a un recipiente a presión y se transfieren con aire comprimido a un evaporador antes de alimentarlos al reactor. El CO producido se oxida con aire para formar CO<sub>2</sub>, que junto con el HCl y HF son absorbidos por una solución de hidróxido de calcio (ICF, 2018; UNEP, 2002).

Los informes de ICF (2018) y TEAP (2018) reportan la tecnología de arco de plasma portátil, que consiste en una unidad portátil de destrucción por plasma a pequeña escala, con una capacidad de 1 – 2 kg/h para destruir algunas SAO, como el CFC-12. Esta unidad portátil tiene características de proceso similares a las unidades de destrucción por arco de plasma de nitrógeno a mayor escala.

En la Tabla 3-4 se resumen las principales ventajas y desventajas de las tecnologías de plasma aprobadas por el Protocolo de Montreal para la destrucción de SAO.

**Tabla 3-4. Ventajas y desventajas de las tecnologías de plasma**

<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Arco de plasma de argón	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnología probada comercialmente para la destrucción de SAO.</li> <li>• Alta eficiencia de destrucción de CFC y halones a escala comercial.</li> <li>• Emisiones muy bajas de PCDD/F.</li> <li>• Las emisiones másicas de contaminantes son muy bajas debido al volumen relativamente bajo de gases de combustión producidos por el proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las SAO recuperadas deben ser tratadas previamente para eliminar el aceite antes de su destrucción.</li> <li>• Las sales de haluro producidas por la neutralización de los gases ácidos deben ser tratadas antes de ser vertidas al medio ambiente.</li> <li>• Requiere un sistema robusto de suministro de energía eléctrica y alta capacidad de generación de vapor, así como asegurar el suministro de consumibles (argón, hidróxido de sodio)</li> <li>• Requiere asistencia técnica y mantenimiento especializados.</li> </ul>

<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Plasma de radiofrecuencia de acoplamiento inductivo (ICRF plasma)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El proceso ha sido demostrado a escala comercial para lograr una alta destrucción de CFC y una baja emisión de contaminantes.</li> <li>• Al no requerir argón, su funcionamiento puede ser menos costoso que el del proceso de arco de plasma de argón.</li> <li>• El bajo volumen de gas producido por el proceso da lugar a bajos niveles de emisión masiva de contaminantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto consumo de energía requerido para la generación de plasma.</li> <li>• Necesidad de asegurar el suministro de consumibles.</li> <li>• Las sales de haluro producidas por la neutralización de los gases ácidos deben ser tratadas antes de ser vertidas al medio ambiente.</li> <li>• Requiere asistencia técnica y mantenimiento especializados.</li> <li>• La planta de destrucción reportada en 2002 en Japón no estaba en operación en 2018 (UNEP, 2018a).</li> </ul>
Plasma de microondas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta eficiencia de destrucción gracias a la altísima temperatura del proceso y a las bajísimas emisiones de contaminantes atmosféricos.</li> <li>• El proceso es capaz de alcanzar altas temperaturas en muy poco tiempo, lo que proporciona flexibilidad de funcionamiento y reduce el tiempo de inactividad.</li> <li>• No es necesario un gas inerte para el funcionamiento del proceso, lo que mejora la eficiencia energética, reduce el costo de funcionamiento y minimiza el volumen de gases de combustión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las sales de haluro producidas por la neutralización de los gases ácidos deben ser tratadas antes de ser vertidas al medio ambiente.</li> <li>• Se requiere un alto consumo de energía para la generación de plasma.</li> <li>• La planta de destrucción reportada en 2002 en Japón no estaba en operación en 2018 (UNEP, 2018a).</li> </ul>
Arco de plasma de nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El equipo tiene un tamaño muy compacto. El sistema sólo requiere una superficie de 9 m x 4,25 m para su instalación, incluyendo una unidad de precipitación y deshidratación de los subproductos.</li> <li>• El sistema móvil puede transportarse en un camión hasta el lugar de generación de residuos para su tratamiento in situ.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las sales de haluro producidas por la neutralización de los gases ácidos deben ser tratadas antes de ser vertidas al medio ambiente.</li> <li>• Se requiere un alto consumo de energía para la generación de plasma.</li> <li>• Para los equipos portátiles (1 - 2 kg/h) los costos de operación son elevados (30 - 50,000 US\$/año)</li> <li>• Las plantas de destrucción reportadas en 2002 en Japón no estaban en operación en 2018. Sin embargo, la tecnología está en uso para destrucción de HFC-23 en China (UNEP, 2018a).</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3. Tecnologías de conversión

Las tecnologías de conversión o no incineración se basan principalmente en la transformación química para destruir sustancias y transforman irreversiblemente los halocarbonos en otros productos como ácidos, monómeros de vinilo, etc. (UNEP, 2018a).

#### a) Reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>

Este proceso opera en un rango de temperatura de 300 a 1000 °C y un rango de presión de 1 a 30 atmósferas y convierte las SAO y HFC a HF, HCl, CO y H<sub>2</sub>O. Se utiliza un

catalizador para ayudar a la conversión del haluro orgánico en haluro de hidrógeno anhidro y monóxido de carbono (ICF, 2018).

Los subproductos se separan y se recolectan con una alta pureza y podrían venderse para recuperar los costos operativos. La tecnología está patentada en los EE. UU., China y otros doce países que producen refrigerantes y cuenta con el apoyo del Fondo Multilateral para un proyecto demostrativo en China para la conversión de HFC-23. A escala comercial, se espera que esta tecnología sea considerablemente menos costosa y más sostenible que la tecnología de destrucción actual (Midwest Refrigerants, 2017).

#### **b) Deshalogenación catalítica en fase gaseosa**

El proceso de deshalogenación catalítica en fase gaseosa destruye los CFC a 400 °C a presión atmosférica, lo que requiere menos consumo de energía que las tecnologías de incineración. El proceso no emite dioxinas ni furanos y emite cantidades muy pequeñas de otros contaminantes. El HCl y el HF producidos se absorben en una solución de cal (UNEP, 2002).

Se desconoce si esta tecnología está actualmente en uso para la destrucción comercial de SAO (ICF, 2018).

#### **c) Reactor de vapor sobrecalentado**

En este proceso, la descomposición de las SAO tiene lugar en fase gaseosa y a temperaturas elevadas. Los CFC, HCFC y HFC se descomponen, principalmente por hidratación, en un reactor cuyas paredes se calientan eléctricamente en un rango de temperatura entre 850 y 1000 °C. Los fluorocarburos se mezclan primero con vapor y aire y se precalientan a aproximadamente 500 °C antes de colocarlos en el reactor. Los subproductos del proceso (HF, HCl y CO<sub>2</sub>) se apagan con una solución de hidróxido de calcio para neutralizar los gases ácidos y minimizar las emisiones de dioxinas y furanos (ICF, 2018; UNEP, 2002).

Debido a su tamaño compacto, esta tecnología se puede utilizar para instalaciones de destrucción móvil.

#### **d) Reacción térmica con metano**

La reacción de metano y SAO ocurre en un reactor de flujo de tapón a presión atmosférica y alta temperatura (hasta 800 °C), con tiempos de residencia entre 0,1 y 1,3 segundos (Tran et al., 2000).

Se han estudiado las cinéticas de reacción para este proceso, sin embargo, se desconoce si la tecnología está actualmente en uso para la destrucción comercial de SAO (ICF, 2018).

En la Tabla 3-5 se resumen las principales ventajas y desventajas de las tecnologías de conversión (no incineración) aprobadas por el Protocolo de Montreal para la destrucción de SAO.

**Tabla 3-5. Ventajas y desventajas de las tecnologías de conversión**

<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Reacción química con H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub>	Sin información.	Sin información.
Deshalogenación catalítica en fase gaseosa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnología eficiente en la destrucción</li> <li>• No produce emisiones de PCDD/F.</li> <li>• Opera a temperatura más baja que los procesos de incineración, por lo que requiere menos energía.</li> <li>• Bajas emisiones másicas de contaminantes, debido al bajo flujo de gases de proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos costos de destrucción</li> <li>• Las sales de haluro producidas por la neutralización de los gases ácidos deben ser tratadas antes de ser vertidas al medio ambiente.</li> </ul>
Reactor de vapor sobrecalentado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta eficiencia de destrucción y bajas emisiones, como resultado de la alta temperatura de operación, enfriamiento de los gases de proceso y bajo volumen de gases de proceso.</li> <li>• Fácil mantenimiento, diseño simple y seguridad en la operación (opera a presión negativa).</li> <li>• El diseño compacto permite la aplicación en instalaciones móviles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las sales de haluro producidas por la neutralización de los gases ácidos deben ser tratadas antes de ser vertidas al medio ambiente.</li> </ul>
Reacción Térmica con metano		Se desconoce si esta tecnología está en uso para destrucción comercial de SAO.

Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Otras tecnologías de destrucción de SAO y HFC

Se presentan otras tecnologías de destrucción de SAO que no han sido aprobadas por el Protocolo de Montreal, sin embargo, se ha demostrado que funcionan de acuerdo con las directrices del TEAP.

Tres de estas tecnologías fueron citadas en 2015 por el Comité de Opciones Técnicas de Productos Químicos (CTOC, por sus siglas en inglés) como nuevas en uso y posiblemente aprobadas por el Protocolo de Montreal en el futuro: arco de plasma de vapor, destrucción catalítica y conversión a fluoruro de vinilideno.

#### 3.3.1. Tecnologías de incineración

##### a) Incinerador de hogar fijo

Los incineradores de hogar fijos funcionan de manera similar a los incineradores de horno rotatorio, pero utilizan cámaras de combustión fijas para destruir los desechos líquidos a temperaturas que van de 760 a 980 °C. Los desechos sólidos se colocan en la cámara de combustión primaria donde se queman; la ceniza residual se retira de la cámara primaria y los gases derivados se mueven hacia la cámara de combustión secundaria para su posterior destrucción. Los incineradores de hogar fijo se utilizan normalmente para incinerar lodos de depuración, desechos médicos y desechos patológicos, pero también pueden utilizarse para destruir SAO (ICF, 2009).

### **3.3.2. Tecnologías de plasma**

Las tecnologías de plasma tienen un alto DRE y un alto potencial para la recuperación y reciclaje de halógenos, sin embargo, estas tecnologías tienen un alto consumo de energía (Morita & Shiratori, 2021).

#### **a) Arco de plasma de vapor**

La tecnología de arco de plasma de vapor inyecta SAO y vapor de alta temperatura en un reactor con una temperatura superior a 1300 °C. La reacción de hidrólisis del plasma de vapor descompone rápida y eficientemente los CFC, HCFC, halones y PFC, formando H<sub>2</sub> y CO bajo la columna de plasma, que luego se oxidan a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O a través de la adición de pequeñas cantidades de aire en una zona separada. La corriente de gas se enfría rápidamente para evitar cualquier reforma de dioxinas y furanos. El DRE fue superior al 99.9999% cuando se destruyó CFC-12 (CTOC, 2015; ICF, 2018).

#### **b) Arco de plasma de aire**

La tecnología de arco de plasma de aire destruye los CFC y los HCFC al inyectarlos en una cámara de reacción llena de aire, gas de petróleo licuado y agua. El aire se calienta a aproximadamente 1300 °C en un generador de plasma y los CFC y HCFC se separan en H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, HCl y HF. Estos gases resultantes se enfrían por inyección de agua una vez que salen de la cámara de reacción y se lavan en una torre de aspersion. Los ácidos se eliminan de los gases como cloruro de calcio y fluorita añadiendo hidróxido de calcio a la mezcla. El gas se lava por segunda vez en un lecho empacado para garantizar que se eliminen todos los ácidos. El gas se libera a través de una pila después de pasar a través de un precipitador electrostático húmedo, la fluorita se elimina como lodo en un tanque de sedimentación y la solución de cloruro de calcio se usa para reducir el polvo en caminos de grava o se elimina (ICF, 2009).

Una instalación experimental de destrucción por plasma de aire se encuentra en Suecia, destruyendo CFC-11, CFC-12 y HCFC-22 a una velocidad de unos 300 kg/h (ICF, 2009).

### **3.3.3. Tecnologías de conversión**

#### **a) Destrucción catalítica**

En este proceso, los fluorocarburos se destruyen a temperaturas moderadas utilizando un catalizador para ayudar a la conversión (ICF, 2018).

Aunque se alcanza una alta tasa de descomposición, se requiere la recuperación periódica del catalizador, debido a la desactivación causada por la reacción con HF (Morita & Shiratori, 2021).

Una planta de reciclaje de electrodomésticos con capacidad de destrucción de SAO está operando con esta tecnología en Estados Unidos y varias plantas comerciales están operando en Suecia, Dinamarca y el Reino Unido (CTOC, 2015; ICF, 2018).

## b) Conversión a fluoruro de vinilideno

La conversión de HFC-152a a fluoruro de vinilideno (o fluoruro de vinilo), a través del proceso de cloración y de cloración, es un proceso comercial que se está utilizando en plantas de producción química en los Estados Unidos. El HFC-152a es una materia prima o un producto químico intermedio en estos procesos de producción. Se han desarrollado otros procesos comerciales para producir fluoruro de vinilideno a partir de HFC-152a (ICF, 2018).

## 3.4. Tecnologías de destrucción de PCB

**Tabla 3-6. Tecnologías para la destrucción de PCB y desechos contaminados con PCB**

Proceso	Condiciones de operación	Ventajas	Desventajas	Estado de desarrollo	Aplicabilidad
<b>Tratamiento térmico</b>	800°C < T < 1200°C Presiones bajas. Tiempos de residencia del orden de segundos.	Sistema de flujo continuo, amplia aplicabilidad y eficiencia de destrucción	Costo elevado, alta temperatura. Emisión de gases tóxicos: PCDD, PCDF, N/SOx	Comercial	Residuos sólidos y líquidos, suelos contaminados
<b>Oxidación en agua bajo condiciones críticas</b>	400°C < T < 600°C P > 200 atm Tiempos de residencia del orden de segundos-minutos	Sistema cerrado de flujo continuo y alta eficiencia de destrucción con escasa formación de gases tóxicos	Alta corrosión. Condiciones de presión y temperatura altas	Piloto	Residuos líquidos
<b>Decloración química</b>	Uso de catalizadores, hidrógeno, sodio	Sistema de flujo continuo operado a baja temperatura y presión	Baja eficiencia de destrucción. Costo elevado	Piloto	Aceite contaminado con PCB
<b>Reducción química en fase gas</b>	Alta temperatura	Sistema de flujo continuo con alta eficiencia de destrucción	Usa hidrógeno, riesgo de explosión costo elevado	Comercial	Aceite contaminado con PCB

Fuente: Adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

Como se dijo al inicio de este capítulo, las tecnologías de destrucción de SAO deben satisfacer los criterios de capacidad técnica, que indican hasta qué punto se ha demostrado que la tecnología puede eliminar las SAO o una sustancia orgánica halogenada recalcitrante comparable, como los PCB, de manera efectiva y a escala comercial (UNEP, 2002).

Teniendo en cuenta lo anterior, se revisaron algunas tecnologías usadas para la eliminación de PCB, con el propósito de evaluar si cumplen con los criterios establecidos para la destrucción de SAO.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia realizó un trabajo de revisión de procesos para la eliminación de PCB y desechos contaminados con PCB, algunos de estos procesos se encuentran resumidos en la Tabla 3-6.

Algunos de los procesos citados en la tabla 3-3, como el tratamiento térmico y la declorinación química, ya han sido citados como tecnologías estudiadas para la destrucción de SAO.

#### **a) Tecnología de oxidación con agua supercrítica**

La tecnología de oxidación en agua supercrítica (SCWO, por sus siglas en inglés) es un proceso que se lleva a cabo usualmente a una temperatura entre 450 y 550 °C y presiones solo ligeramente superiores a las del punto crítico del agua (647 K y 22,1 MPa). Requiere un agente oxidante, que regularmente es el peróxido de hidrógeno (8 a 10 % v/v), el cual es presurizado junto con el contaminante orgánico y precalentado previa entrada al reactor. Se obtienen como subproductos el dióxido de carbono, nitrógeno gaseoso y en el caso de sustancias orgánicas cloradas, se forma el ácido correspondiente. El efluente del reactor se enfría a temperatura ambiente por medio de un intercambiador de calor y se despresuriza por medio de una válvula de regulación de caudal que además controla la presión del sistema, permitiendo la separación de las fases gaseosa y líquida al final del proceso. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Una de las ventajas de este proceso, respecto a la incineración, es la operación a menor temperatura, lo que reduce considerablemente la posibilidad de formación de dioxinas y furanos, los cuales no se detectan en los efluentes del proceso, con un porcentaje de destrucción cercano al 100%.

### **3.5. Destrucción de SAO y HFC a nivel mundial**

#### **3.5.1. Instalaciones de destrucción de SAO y HFC a nivel mundial**

Para el 2018 existían a nivel mundial cerca de 155 plantas de destrucción de SAO en 28 países. Japón es el país con el mayor número de plantas de destrucción de fluorocarbonos y por lo tanto un referente del uso actual de las diferentes tecnologías.

De acuerdo con un estudio reciente, el número de plantas de destrucción en Japón se redujo de 82 en 2004 a 58 en 2019, siendo la incineración con residuos y la reacción con vapor sobrecalentado las principales tecnologías usadas actualmente. Las tecnologías de plasma prácticamente desaparecieron, ya que en 2004 había 17 instalaciones de destrucción por plasma, mientras que en 2019 solo permanecía en operación una instalación de arco de plasma, probablemente por la competencia con los reactores de vapor sobrecalentado y dificultades técnicas (Morita & Shiratori, 2021).

Respecto a la incineración con residuos, la tecnología más usada es el horno rotatorio. Las tecnologías de incineración de inyección líquida y oxidación de gases/humos están asociadas a los fabricantes de productos fluorados. Es importante resaltar que los reactores de vapor sobrecalentado son ampliamente usados en Japón (21 instalaciones en 2019) por gestores de residuos, proveedores de gases, empresas de mantenimiento del sector RAC y proveedores especializados de fluorocarburos, lo que permite suponer que esta tecnología es de fácil instalación y puede ser usada incluso por personal no especializado (Morita & Shiratori, 2021).

### 3.5.2. Costo de destrucción de SAO y HFC

Para el 2008 el Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal estimó el costo medio de destrucción de SAO concentradas en Estados Unidos en 1,5 - 12,5 US/kg, mientras que en el 2009 el TEAP estimó el costo medio internacional de destrucción de SAO concentradas en 4 - 6 US/kg para refrigerantes o agentes espumantes, y en 6 - 8 US/kg para halones (ICF, 2018).

Los costos reales de destrucción dependen de la cantidad de SAO enviada para su destrucción y de la tecnología utilizada. En general, las instalaciones comerciales que utilizan la tecnología de incineración tienen costos más bajos que las que utilizan la tecnología de arco de plasma (ICF, 2018).

En la Tabla 3-7 se listan los países con tecnologías de destrucción de SAO a escala comercial, así como el número de plantas en operación y las tecnologías utilizadas. La capacidad de destrucción y los costos de operación no están disponibles en la mayoría de los casos

**Tabla 3-7. Plantas de destrucción de SAO a nivel comercial en el mundo**

País	No. de plantas en operación	Tecnologías	Capacidad de destrucción SAO (t/año)	Costo de destrucción (\$US/kg)
<b>Alemania</b>	7	Incinerador de residuos peligrosos Reactor de craqueo Reactor térmico poroso	1600 <sup>a</sup>	
<b>Algeria</b>	1	Horno cementero		
<b>Argentina</b>	>2	NA		
<b>Australia</b>	2	Arco de plasma de argón	600	7
<b>Austria</b>	1	NA		
<b>Bélgica</b>	2	Horno rotatorio		
<b>Brasil</b>	>4	Horno rotatorio Reactor de craqueo Arco de plasma de argón Reacción química con H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub>		
<b>Canadá</b>	1	Horno rotatorio <sup>b</sup>		12
<b>Colombia</b>	1	Horno rotatorio		
<b>Cuba</b>	1	Horno cementero		
<b>Dinamarca</b>	4	Craqueo catalítico		
<b>Eslovaquia</b>	1	No disponible		

País	No. de plantas en operación	Tecnologías	Capacidad de destrucción SAO (t/año)	Costo de destrucción (\$US/kg)
<b>España</b>	1	No disponible		
<b>Estados Unidos</b>	11	Horno rotatorio Arco de plasma Incinerador de hogar fijo Incineración de inyección líquida Horno cementero Hornos para agregados ligeros	318	2 - 13
<b>Estonia</b>	1	No disponible		
<b>Finlandia</b>	1	Horno rotatorio	545	
<b>Francia</b>	2	No disponible		
<b>Hungría</b>	5	Horno rotatorio Incineración de inyección líquida	75 <sup>c</sup> 13	
<b>Indonesia</b>	1	Horno cementero	600	
<b>Italia</b>	12	No disponible		
<b>Japón</b>	80	Horno cementero/horno rotatorio de cal (7) Horno rotatorio/Incinerador de residuos sólidos municipales (24) Incineración de inyección líquida (7) Arco de plasma de nitrógeno (8) Plasma de microondas (5) Plasma de radiofrecuencia (1) Deshalogenación catalítica en fase gaseosa (1) Reactor de vapor sobrecalentado (25) Reactor alcalino en fase sólida (1) Horno eléctrico (1)	2600 (1 incinerador)      36	4  9  5 - 7 5
<b>Países bajos</b>	6	No disponible		
<b>Polonia</b>	1	No disponible		
<b>Reino Unido</b>	2	Incineración a alta temperatura		
<b>República Checa</b>	1	Horno rotatorio	40	
<b>Suecia</b>	4	Arco de plasma de aire Otros	100	
<b>Suiza</b>	>4	Horno rotatorio Otros	910 <sup>a</sup> 320	
<b>Venezuela</b>	>2	No disponible		

<sup>a</sup> Capacidad no específica para SAO, los valores se refieren a la capacidad total de destrucción de residuos peligrosos y/o otros tipos de residuos.

<sup>b</sup> No acepta SAO para destrucción comercial.

<sup>c</sup> Capacidad de destrucción de SAO aproximada basada en la capacidad total de la planta y tasas de alimentación de SAO típicas para hornos rotatorios.

Fuente: (ICF, 2018)

### 3.6. Destrucción de SAO en Colombia

En Colombia, al igual que en otros países, la implementación de los proyectos promovidos por el Protocolo de Montreal con el objetivo de reducir el consumo de SAO, han llevado a

la existencia de bancos de residuos de estas sustancias, que requieren de una gestión ambiental adecuada.

Como se dijo en el capítulo 2, en el país la mayor parte de los bancos de SAO y HFC potencial o efectivamente disponibles para gestión son residuos de sustancias refrigerantes (CFC, HCFC y HFC) y espumas de poliuretano con CFC y HFC. Aunque en el país existe una Red de Recuperación, Reciclaje y Regeneración de gases refrigerantes (Red R&R&R), con la que se busca promover la recuperación, tratamiento y reutilización de las sustancias refrigerantes, no siempre es posible reciclar o regenerar los refrigerantes recuperados, debido al grado de contaminación o simplemente porque ya no existe un mercado para el uso de estas sustancias en el país, como es el caso del CFC-11 y el CFC-12. Estos residuos de refrigerantes y las espumas de poliuretano que contienen SAO deben ser entonces enviados a destrucción.

La Unidad Técnica Ozono ha estado estudiando la posibilidad de contar con instalaciones para la destrucción de SAO en el país desde el año 2003. La UTO ha realizado diferentes análisis y estudios con la Cámara de Electrodomésticos de la ANDI, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de los Andes y la Corporación Ambiental de la Cámara de Comercio de Bogotá (CAEM), así como con gestores de residuos peligrosos y RAEE, entre otras instituciones, con el objetivo de recopilar información sobre los bancos de SAO y examinar las opciones para su gestión ambientalmente adecuada.

En 2008 se realizó un proyecto piloto de sustitución de refrigeradores domésticos en Bogotá, en el cual se recolectaron refrigerantes (CFC-12) y espumas de poliuretano con CFC-11. El CFC-12 recuperado fue exportado para su destrucción a través de un gestor de residuos peligrosos, mientras que la espuma que contiene CFC-11 fue almacenada para su posterior destrucción en dos hornos nacionales de incineración de residuos industriales.

Entre 2012 y 2019, Colombia ejecutó un proyecto demostrativo piloto para la gestión integral de residuos de SAO, con el propósito de demostrar la viabilidad técnica, económica y ambiental de destruir SAO a nivel nacional, financiado por el Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal. En el marco del proyecto se realizó una revisión inicial de las alternativas para la gestión ambiental de los residuos de SAO en Colombia, considerando las siguientes opciones: exportación de los residuos de SAO para su destrucción, establecimiento de nuevas instalaciones de destrucción en Colombia y adecuación de instalaciones ya existentes para la destrucción de residuos peligrosos e industriales. La alternativa seleccionada fue la adecuación de un horno rotatorio de incineración a alta temperatura que se utiliza para la incineración comercial de residuos peligrosos.

El proyecto demostrativo incluyó la ejecución de pruebas de quemado<sup>13</sup> para la destrucción de CFC y espumas de poliuretano con CFC/HCFC en el horno rotatorio seleccionado, así como la preparación de la infraestructura nacional para recolectar y destruir aproximadamente 114 toneladas de CFC (refrigerante y espuma).

Las pruebas de quemado se realizaron con éxito durante los años 2016 y 2017 y los resultados demostraron que la instalación actual puede usarse para la destrucción de CFC-11, CFC-12 y espumas con CFC-11 y HCFC-141b, cumpliendo con los criterios técnicos,

---

<sup>13</sup> La prueba de quemado es una verificación en campo de las condiciones de operación bajo las cuales una instalación realizará el tratamiento de los diferentes residuos (Resolución 909 de 2008, Resolución 2153 de 2010)

con limitaciones de contenido de cloro en la alimentación y con un costo aproximado de 6 – 6,5 US\$/kg para la destrucción de los CFC. Sin embargo, el costo de la destrucción de las espumas con SAO es demasiado alto y por lo tanto es necesario revisar otras opciones para la destrucción de espumas, como la destrucción completa del cuerpo y las puertas de los refrigeradores en un horno de fundición o la destrucción de fuentes concentradas y diluidas de SAO en hornos cementeros (UNEP, 2018b).

De acuerdo con la UTO, la capacidad estimada del horno de incineración está en el rango de 25 a 50 t/año de SAO en una sola unidad y en el futuro podrían estar disponibles hasta tres unidades. La instalación aún no ofrece la destrucción comercial de SAO, ya que se requiere la modificación de la licencia ambiental, se espera que entre en funcionamiento en 2021 o 2022.

Es importante tener en cuenta que para la selección de la tecnología de destrucción de SAO y HFC en Colombia es necesario cumplir con los límites de emisiones establecidos por la legislación nacional, que pueden ser más exigentes que los criterios establecidos por el Protocolo de Montreal.

En la Tabla 3-8 se incluyen los estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas establecidos por la Resolución 909 de 2008 de Minambiente y se comparan con los valores establecidos por el TEAP en 2002.

**Tabla 3-8. Estándares de emisión de contaminantes para fuentes fijas en Colombia**

Emisión	Unidades <sup>a</sup>	TEAP 2002	Resolución 909 de 2008	
		Fuentes concentradas	Hornos Cementeros con coprocesamiento de respel <sup>b</sup>	Instalaciones de incineración de respel <sup>c</sup>
PCDD/PCDF	ng-ITEQ/Nm <sup>3</sup>	0,2	0,1	0,1
HCl/Cl <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	100	10	10
HF	mg/Nm <sup>3</sup>	5	1	1
MP	mg/Nm <sup>3</sup>	50	50	10
CO	mg/Nm <sup>3</sup>	100	-	50

<sup>a</sup> Los límites de emisión se expresan como unidad de masa por metro cúbico seco de gases de escape a 0°C y 101,3 kPa, corregidos a 11% de O<sub>2</sub> (metro cúbico normalizado, Nm<sup>3</sup>).

<sup>b</sup> Promedio diario

<sup>c</sup> Promedio diario para instalaciones con capacidad igual o superior a 500 kg/h

Fuente: Elaborado a partir de (Minambiente, 2008; UNEP, 2002)

### 3.6.1. Necesidad de instalaciones de destrucción de SAO y HFC en Colombia

De acuerdo con lo expuesto en el numeral 2.4, para el año 2030 los bancos de SAO y HFC efectivamente disponibles para gestión se estimaron en 47 t/año (8 kg/h) en el escenario BAU y en 265 t/año (44 kg/h) en el escenario de aumento de la tasa de recolección de equipos de RAC. El 95% de estas sustancias corresponde a HFC y sólo el 5% restante corresponde a SAO, principalmente HCFC.

Teniendo en cuenta lo anterior, suponiendo que todas las SAO y HFC deben destruirse y que el horno rotatorio que ya fue adecuado funciona a su capacidad máxima (50 t/año), en

Colombia se requerirán 215 t/año (36 kg/h) adicionales de capacidad de destrucción de SAO y HFC, para el año 2030.

En un tercer escenario, suponiendo un aumento en la tasa de recolección de equipos de RAC y considerando que la capacidad de regeneración total del país es de aproximadamente 115t/año, para el año 2030 se requerirán 100 t/año (17 kg/h) de capacidad adicional de destrucción de SAO y HFC.

Bajo este panorama es necesario analizar cuáles son las opciones tecnológicas que podrían ser implementadas en Colombia para la destrucción de SAO y HFC, principalmente HFC.

### 3.7. Barreras para la implementación de tecnologías de destrucción de SAO y HFC en Colombia

Para que la implementación de las tecnologías de destrucción de los bancos de SAO y HFC en Colombia se pueda llevar a cabo de forma ambientalmente responsable es importante identificar las barreras existentes.

Las barreras se pueden definir como los limitantes tecnológicos, logísticos, financieros, informativos, legales y socioculturales que están asociados a cada tecnología de acuerdo con las características del país que pretende colocar una instalación de destrucción de SAO en su territorio. Algunos de los parámetros analizados son el tamaño del país, su economía, el marco regulatorio, la capacidad institucional, la geografía, infraestructura de transporte, población y la conciencia existente sobre las problemáticas ambientales (ICF, 2008).

En la Tabla 3-9, se incluyen un análisis de las barreras políticas, técnicas, económicas, sociales y de información, identificadas para la implementación de tecnologías de destrucción de SAO y HFC en Colombia.

**Tabla 3-9. Barreras identificadas para la implementación de tecnologías de destrucción de SAO y HFC en Colombia**

Barreras	Estado en Colombia
<b>Políticas</b>	
La instalación o adaptación de plantas de destrucción puede verse afectada por la legislación o políticas locales.	Existen incineradores de residuos sólidos industriales (hornos rotatorios) y hornos cementeros que pueden ser adaptados para permitir la destrucción de SAO y HFC.  Hasta el año 2018, la legislación nacional no permitía la destrucción de SAO por tratamiento térmico (incineración). Sin embargo, la Resolución 2267 de 2018 de Minambiente incluyó los residuos de CFC, HCFC y HFC entre los residuos permitidos en el tratamiento térmico en instalaciones de incineración de residuos y/o desechos peligrosos y hornos cementeros que realicen coprocesamiento.
<b>Técnicas</b>	
Factibilidad de recuperación de los equipos y productos que contienen las SAO y HFC al final de su vida útil.	A nivel nacional se cuenta con un programa de posconsumo de electrodomésticos, que integra a los fabricantes de refrigeradores y aires acondicionados, mediante iniciativas de responsabilidad extendida. Asimismo, existen actualmente dos programas, uno nacional y otro regional, que promueven la sustitución de neveras

<b>Barreras</b>	<b>Estado en Colombia</b>
	<p>viejas y la recuperación de SAO y HFC para su posterior tratamiento y disposición.</p> <p>Sin embargo, estos programas funcionan esencialmente en las principales ciudades, por lo que la recuperación de SAO en ciudades intermedias o áreas rurales es poco significativa. La tasa de recolección aún es muy baja, se estima en 5% del total de las SAO y HFC potencialmente disponibles para gestión (UTO &amp; GIZ, 2018).</p> <p>Se espera que en los próximos años esta tasa de recolección pueda aumentar, llegando a un valor cercano al 30% para el año 2030, con la expedición de la legislación nacional que regule los programas de posconsumo de RAEE.</p>
<p>Factibilidad de recuperación de las SAO y HFC de los equipos de RAC y extinción de incendios en las labores de mantenimiento y reparación.</p>	<p>A pesar de la existencia de las Buenas Prácticas de Refrigeración (BPR), encuestas realizadas por la UTO encontraron que el 46% de los técnicos que intervienen los equipos con refrigerantes no lo recupera, el 31% no ha sido capacitado y solo el 16% de los técnicos cuentan con recuperadora y cilindros de recuperación (UTO, 2020a).</p> <p>A través de la UTO, en Colombia se ejecuta de manera permanente un programa de formación y certificación en competencias laborales para los técnicos del sector RAC, en trabajo conjunto con el SENA. Sin embargo, los datos anteriores muestran que es necesario incluir en la legislación nacional medidas de control, por ejemplo, la prohibición explícita de emitir refrigerantes a la atmósfera, la obligatoriedad de realizar inspecciones periódicas de fugas a los equipos de RAC y la obligatoriedad de la certificación en buenas prácticas de refrigeración para los técnicos.</p>
<p>La destrucción de las SAO debe realizarse en instalaciones que cumplan con los criterios técnicos mínimos establecidos por el TEAP del Protocolo de Montreal.</p>	<p>Para las tecnologías que ya se encuentran instaladas en el país, como los hornos rotatorios y hornos cementeros, en general se requiere la modernización de los equipos de monitoreo ambiental y las pruebas de funcionamiento, con el fin de que sean aptos para la destrucción de SAO y HFC, cumpliendo con los criterios de referencia establecidos por el Protocolo de Montreal y la legislación colombiana de emisiones de fuentes fijas.</p> <p>Dado que el mercado de destrucción de SAO es incipiente en el país y aún no se cuenta con opciones para la destrucción de HFC, esta barrera se puede superar, a través de la implementación de proyectos demostrativos y proyectos piloto, que apoyen técnica y económicamente la introducción de nuevas tecnologías para la destrucción de SAO y HFC en Colombia.</p>
<p>La mayoría de las tecnologías de destrucción requiere capacitación especializada del talento humano para su implementación en el país.</p>	<p>Dependiendo la tecnología, es posible que se requiera la transferencia de conocimientos y capacitación inicial por parte de expertos internacionales, lo cual se traduce en costos adicionales para la implementación.</p> <p>Esta barrera se puede superar, a través de la implementación de proyectos demostrativos y proyectos piloto, que apoyen técnica y económicamente la introducción de nuevas tecnologías para la destrucción de SAO y HFC en Colombia.</p>
<p><b>Económicas</b></p>	
<p>La construcción o adaptación de nuevas instalaciones de destrucción de SAO no siempre es factible, rentable o respetuosa con el medio ambiente, dada la huella de carbono de las</p>	<p>En Colombia se han evaluado varias propuestas para la destrucción de SAO, algunas de las cuales se no se han llevado a cabo por sus costos. Por ejemplo, en la adecuación de los hornos cementeros, la modernización de los dispositivos de control puede llegar a los USD\$ 50.000; o la instalación de</p>

<b>Barreras</b>	<b>Estado en Colombia</b>
nuevas construcciones. En ocasiones, la opción preferida es exportar los residuos de SAO a los países desarrollados (ICF, 2018).	<p>dispositivos de recuperación discontinua de pequeña escala cuyo costo estimado está entre 5000 a 1000 USD, en este caso el bajo valor de los refrigerantes vírgenes tampoco favorece la viabilidad del proceso (ICF, 2008)</p> <p>Las restricciones y reglamentación nacional para la exportación de residuos peligrosos, hace que la exportación de SAO y HFC para destrucción sea más costosa que el costo estimado para la destrucción de SAO en el país. Para el año 2012 la destrucción de SAO en el exterior tenía un costo de aproximadamente USD\$10/kg y actualmente se estima en 15 USD\$/kg, mientras que el costo estimado de destrucción de SAO en Colombia es de 6,5 USD\$/kg.</p>
Si los costos de recuperación, transporte, almacenamiento, tratamiento y/o destrucción de las SAO son elevados y no existe ningún incentivo por parte del gobierno u otras instituciones, se favorece que las SAO y los HFC sean liberadas a la atmósfera.	<p>En Colombia los costos logísticos y de transporte son muy altos. Se han generado algunos incentivos por parte de la Unidad Técnica Ozono para promover la recuperación y regeneración de los refrigerantes (SAO y HFC) y la sustitución de neveras viejas que contienen SAO (Ver capítulo 1, numeral 1.4).</p> <p>Sin embargo, es necesario incluir en la legislación nacional medidas de control, por ejemplo, la prohibición explícita de emitir refrigerantes a la atmósfera y la obligatoriedad de realizar inspecciones periódicas de fugas a los equipos de RAC.</p>
<b>Sociales</b>	
La población en general desconoce los peligros ambientales que representan las SAO y en que aparatos están contenidas, lo cual dificulta la recuperación de los inventarios existentes.	<p>A pesar de que hay una gran cantidad de información sobre sustancias peligrosas para el medio ambiente ésta solo llega a una pequeña parte de la población, y la información que llega está mezclada con otra de dudosa procedencia lo que ha generado una desconfianza en todo aquello que tenga que ver con sustancias químicas.</p> <p>La población usualmente se resiste a tener cerca instalaciones que pueden servir para la destrucción de los residuos peligrosos, como por ejemplo hornos incineradores.</p>
<b>Información</b>	
Falta de sistematización de la información nacional	<p>La información sobre inventarios nacionales de bancos o residuos de SAO o HFC es escasa y no es de fácil acceso, ya que no hace parte de los datos abiertos del gobierno.</p> <p>La información sobre inventarios y capacidad de instalaciones de destrucción de residuos peligrosos, por ejemplo, hornos incineradores, es escasa y no es de fácil acceso.</p>

**Fuente:** Elaboración propia

## 4. EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE DESTRUCCIÓN DE SAO Y HFC

Para alcanzar el objetivo general de este trabajo se realizó una evaluación de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC utilizadas a nivel mundial, para su posible aplicación en Colombia, con la base en la información recopilada y analizada en el capítulo 3.

A continuación, se describe la metodología utilizada para la evaluación de las tecnologías, así como los resultados obtenidos a partir de esta evaluación.

### 4.1. Metodología para evaluación de las tecnologías

Para la evaluación de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC se usó un método de análisis de decisiones con criterios múltiples (Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA). Los métodos de análisis multicriterio son herramientas diseñadas para ayudar a elegir la mejor opción entre muchas opciones posibles, teniendo en cuenta una multitud de criterios que caracterizan la aceptabilidad de las distintas variantes de decisión (Wątróbski et al., 2019).

El análisis multicriterio incluye las siguientes etapas (Wątróbski et al., 2019):

1. Definición del problema y del conjunto de alternativas que se deben comparar y clasificar.
2. Definición y ponderación de los criterios de evaluación.
3. Modelación del sistema con el método elegido.
4. Implementación de la decisión.

En el MCDA, los pesos o ponderaciones de los criterios reflejan la importancia relativa de cada criterio, a mayor peso mayor importancia del criterio. Los pesos deben ser números positivos y adimensionales. Una vez obtenidos, los valores de los pesos  $w_j$  son normalizados, de manera que se cumpla la *Ecuación 6*.

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1 \quad \text{Ecuación 6}$$

Los métodos MCDA incluyen, entre otros, el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process – AHP) y el Método de Organización de Clasificación de Preferencias para Evaluaciones de Enriquecimiento (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations – PROMETHEE).

En este trabajo se usó una aproximación integrada del método AHP y el método PROMETHEE, con el propósito de evaluar las tecnologías de destrucción de SAO y HFC y

establecer un escalafón de preferencia entre estas, considerando criterios técnicos, ambientales y económicos.

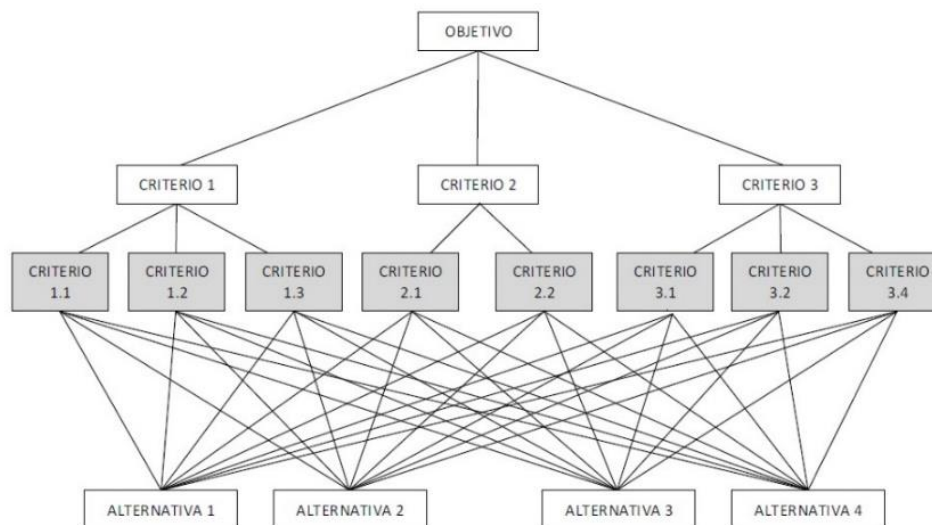
#### 4.1.1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), propuesto por Saaty en 1980, es un método basado en la evaluación de diferentes criterios que permiten jerarquizar un proceso. En la

Figura 4-1 se muestra un ejemplo de la estructura jerárquica AHP.

Para que el método AHP sea efectivo, las alternativas que se van a comparar deben ser homogéneas y los criterios y subcriterios deben estar bien definidos, ser relevantes y mutuamente excluyentes. Si las alternativas no son homogéneas, deben dividirse en grupos que sean homogéneos.

**Figura 4-1. Ejemplo de estructura jerárquica AHP**



Fuente: (Yepes Piqueras, n.d.)

La comparación entre pares de alternativas se hace usando la escala fundamental de números absolutos del 1 al 9 que se presenta en la Tabla 4-1. Esta escala fundamental es usada para responder una pregunta básica para la comparación entre pares de alternativas: *¿Cuántas veces es más dominante una alternativa que otra, con respecto a un criterio o atributo?* (Saaty, 2004).

**Tabla 4-1. Escala fundamental de comparación por pares - AHP**

Escala Numérica	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	Importancia moderada	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	Importancia grande	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	Importancia muy grande o demostrada importancia.	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica.
9	Importancia extrema	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible
2,4,6,8	Representan situaciones intermedias	

Fuente: (Saaty, 1980)

El método AHP genera un peso para cada criterio, de acuerdo con las comparaciones realizadas por el evaluador. A mayor peso, mayor importancia del criterio. Seguidamente, para cada criterio de un mismo nivel jerárquico, el método compara las alternativas por pares y asigna una puntuación a cada alternativa. Por último, el método combina los pesos de los criterios y las puntuaciones de las alternativas para obtener una puntuación global (suma ponderada de las puntuaciones respecto a todos los criterios) para cada alternativa, estableciendo así un escalafón de preferencia entre estas.

Una desventaja de este método es que el número de evaluaciones que se deben realizar puede ser muy alto, dependiendo del número de criterios y alternativas.

El método AHP incluye tres etapas (Moreno Jimenez, 2002):

- i. Modelización: Se construye un modelo o estructura en la que se representan todos los aspectos considerados relevantes en el proceso de resolución del problema.
- ii. Valoración: Se incorporan las preferencias, gustos y deseos de los tomadores de decisión mediante juicios incluidos en las denominadas matrices de comparaciones pareadas. Estas matrices reflejan la dominación relativa de un elemento frente a otro con respecto a un atributo.
- iii. Priorización y síntesis: Proporciona las diferentes prioridades consideradas en la resolución del problema.

A continuación, se describe el proceso para la aplicación del método AHP, una vez se han definido el problema, las alternativas y los criterios.

#### **a) Cálculo del vector de pesos de los criterios**

Para calcular el peso de cada criterio se crea una matriz de decisión con los valores de las comparaciones entre pares de criterios, de acuerdo con la Tabla 4-1. Esta matriz cuadrada, donde  $n$  es el número de criterios, cumple con las propiedades de reciprocidad (si  $a_{ij}=x$ , entonces  $a_{ji}=1/x$ ), homogeneidad (si  $i$  y  $j$  son igualmente importantes,  $a_{ij}=a_{ji}=1$ , y,  $a_{ii}=1$  para todo  $i$ ), y consistencia ( $a_{ij}a_{jk}=a_{ik}$ ).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Cada valor de la matriz  $a_{ij}$  representa la importancia relativa del criterio  $i$  con respecto al criterio  $j$ .

Si  $a_{ij} > 1$ , entonces el criterio  $i$  tiene más importancia que el criterio  $j$

Si  $a_{ij} < 1$ , entonces el criterio  $i$  tiene menos importancia que el criterio  $j$

Si  $a_{ij} < 1$ , entonces el criterio  $i$  tiene menos importancia que el criterio  $j$

Si  $a_{ij}=a_{ji}=1$ , entonces el criterio  $i$  tiene igual importancia que el criterio  $j$

Si  $a_{ij}=x$ , entonces  $a_{ji}=1/x$

Una vez construida la matriz de comparación  $A$ , se obtiene la matriz normalizada  $A_{norm}$ .

$$\hat{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$A_{norm} = \begin{bmatrix} C1 & C2 & \dots & C_n \\ 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{a_{21}}{\sum_i a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum_i a_{i2}} & \dots & \frac{a_{2n}}{\sum_i a_{in}} \\ \frac{a_{31}}{\sum_i a_{i1}} & \frac{a_{32}}{\sum_i a_{i2}} & \dots & \frac{a_{3n}}{\sum_i a_{in}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_{n1}}{\sum_i a_{i1}} & \frac{a_{n2}}{\sum_i a_{i2}} & \dots & \frac{1}{\sum_i a_{in}} \end{bmatrix}$$

El vector de pesos de los criterios  $w$  se obtiene calculando el vector propio de la matriz, calculando el promedio de cada fila de  $A_{norm}$ .

$$w_j = \frac{\sum_{j=1}^n \hat{a}_{ij}}{n} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$w = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_n] \quad \text{Ecuación 9}$$

## b) Consistencia de la matriz de decisión

El método AHP permite comprobar la consistencia de las valoraciones con las que se construye la matriz de decisión, lo que permite eliminar la parcialidad del evaluador durante el proceso.

La consistencia se obtiene mediante el cálculo del índice de consistencia (*Consistency Index, CI*). Un índice de consistencia igual a cero significa que la consistencia es completa. Una vez obtenido el CI (*Ecuación 10*), se obtiene la proporción de consistencia (*Consistency Ratio, CR*), usando los valores del índice de consistencia aleatoria (*Random Consistency Index, RI*) indicados en la Tabla 4-2.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde

$\lambda_{max}$  = máximo valor propio

$n$  = dimensión de la matriz de decisión (número de criterios)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Ecuación 11}$$

**Tabla 4-2. Índice de consistencia aleatoria**

Rango de la Matriz	Índice de consistencia aleatoria (RI)
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49

Fuente: (Saaty, 1980)

Si en una matriz el CR supera el 10%, se recomienda revisar las valoraciones (Saaty, 2004).

### c) Cálculo de la matriz de puntuación de las alternativas

Es necesario construir tantas matrices como criterios se hayan definido. Estas matrices son matrices cuadradas  $m \times m$ , donde  $m$  es el número de alternativas del problema. Los valores de cada matriz están dados por la comparación entre pares de alternativas.

Las matrices de comparación de alternativas  $B$  se construyen siguiendo la misma metodología que se explicó para la matriz  $A$  de comparación entre criterios. Estas matrices también deben cumplir con las propiedades de reciprocidad, homogeneidad y consistencia.

Una vez obtenidas todas las matrices  $B$ , se normalizan y se calculan los vectores propios  $s^j$  de cada matriz, que contienen la clasificación de las alternativas del problema en función de cada criterio.

Finalmente, se construye la matriz de puntuación de las alternativas  $S$  adicionando los vectores propios de la matriz de cada criterio.

$$S = [s^1 \quad s^2 \quad \dots \quad s^n] \quad \text{Ecuación 12}$$

#### d) Clasificación de las alternativas

El último paso del método AHP es obtener un vector  $v$  de pesos globales, mediante el producto escalar de la matriz de puntuación de las alternativas  $S$  por el vector de pesos de los criterios  $w$ .

$$v = S \cdot w \quad \text{Ecuación 13}$$

El vector final  $v$ , muestra el peso global de cada alternativa, en función de la totalidad de los criterios, por lo que permite elegir la mejor alternativa. La clasificación de las alternativas se obtiene ordenando los valores obtenidos de mayor a menor. La alternativa con mayor puntuación es considerada la mejor alternativa.

### 4.1.2. PROMETHEE II

El método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations), desarrollado por J.P. Brans en 1982, permiten obtener una clasificación parcial de las alternativas (PROMETHEE I) o una clasificación completa de las alternativas (PROMETHEE II).

El proceso de decisión de PROMETHEE se fundamenta en comparaciones binarias de un conjunto finito de alternativas, de acuerdo con diferentes criterios (Stanković et al., 2021).

Al igual que otros métodos de decisión multicriterio, PROMETHEE requiere definir el problema, las alternativas y los criterios y establecer pesos que reflejen la importancia relativa de cada criterio.

A continuación, se describe el proceso para la aplicación del método PROMETHEE II, una vez se han definido el problema, las alternativas, los criterios y los pesos relativos de cada criterio.

#### a) Función de preferencias

En general, un problema de decisión multicriterio considera un conjunto finito de alternativas  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  y un conjunto de criterios de evaluación  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ .

Para la aplicación el método PROMETHEE el primer paso es calcular la diferencia entre las evaluaciones de pares de alternativas para cada criterio  $g_k$  (Stanković et al., 2021).

$$d_k(a_i, a_j) = g_k(a_i) - g_k(a_j) \quad \text{Ecuación 14}$$

Cuando las diferencias son pequeñas, existe una pequeña preferencia de la alternativa  $a_i$  sobre  $a_j$ , o incluso no hay preferencias si la diferencia es despreciable. A mayor diferencia, mayor preferencia de  $a_i$  sobre  $a_j$ .

El segundo paso es transformar el resultado de esta comparación de pares de alternativas en un grado de preferencia basado en la función de preferencia  $P_k$ . (Stanković et al., 2021).

$$P_k(a_i, a_j) = f[d_k(a_i, a_j)] \quad 0 \leq P_k(a_i, a_j) \leq 1 \quad \text{Ecuación 15}$$

En la Tabla 4-3 se incluyen los seis tipos principales de funciones de preferencia propuestos para la aplicación de PROMETHEE.

### b) Índice de preferencia agregada

El tercer paso es calcular la preferencia total de  $a_i$  sobre  $a_j$  o índice de preferencia agregado, para cada par de alternativas, es decir, cómo y con qué intensidad la alternativa  $a_i$  es preferida a la  $a_j$  para todos los criterios.

$$\pi(a_i, a_j) = \sum_{k=1}^n P_k(a_i, a_j) \cdot w_k \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

$\pi(a_i, a_j)$  Grado de preferencia total de  $a_i$  sobre  $a_j$ ,

$w_k$  Peso que indica la importancia relativa del criterio  $g_k$ .

El índice de preferencia agregado tiene las siguientes propiedades (Fernández Barberis, 2002):

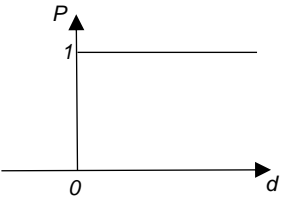
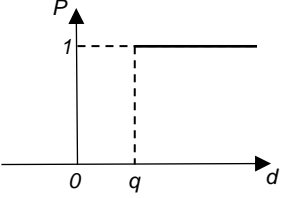
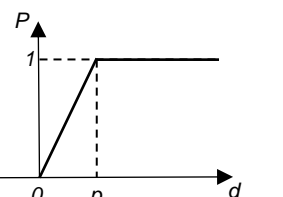
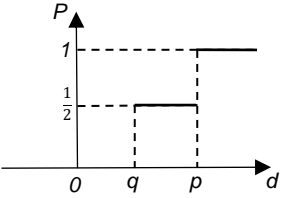
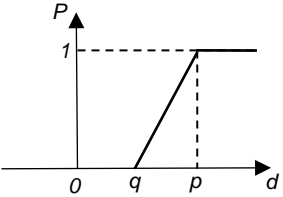
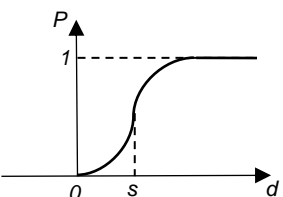
$$\pi(a_i, a_i) = 0$$

$$0 \leq \pi(a_i, a_j) \leq 1 \quad \forall a_i, a_j \in A$$

$\pi(a_i, a_j) \sim 0$  indica una preferencia global débil de  $a_i$  sobre  $a_j$

$\pi(a_i, a_j) \sim 1$  indica una preferencia global fuerte de  $a_i$  sobre  $a_j$

**Tabla 4-3. Principales tipos de funciones de preferencia - PROMETHEEII**

Tipo de función	Definición	Parámetros por definir
Tipo 1: Usual 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1, & d > 0 \end{cases}$	-
Tipo 2: Forma U 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ 1, & d > q \end{cases}$	q
Tipo 3: Forma V 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ \frac{d}{p}, & 0 < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$	p
Tipo 4: Nivel 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{1}{2}, & q < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$	p, q
Tipo 5: Forma V con indiferencia 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{d - q}{p - q}, & q < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$	p, q
Tipo 6: Gausiana 	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}}, & d > 0 \end{cases}$	s

q es el umbral de indiferencia, valor máximo para el que la diferencia entre dos alternativas se considera insignificante.  
 p es el umbral de preferencia, valor mínimo para el que la diferencia entre dos alternativas se considera preferencia absoluta.

s es el punto de inflexión en los modelos más avanzados.

Fuente: (Brans & Mareschal, 2005)

### c) Flujos de superación

Para cada alternativa  $a_i$  el flujo positivo (de salida) se define como la intensidad con la alternativa  $a_i$  es preferida frente a las alternativas restantes ( $m-1$ ).

$$\phi^+(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{a_j \in A} (a_i, a_j) \quad \text{Ecuación 17}$$

Simétricamente, se define el flujo negativo (de entrada), que mide con qué intensidad otras alternativas son preferidas a la alternativa  $a_i$ .

$$\phi^-(a_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{a_j \in A} \pi(a_j, a_i) \quad \text{Ecuación 18}$$

Una alternativa será mejor que otra cuanto mayor sea su flujo positivo y menor sea su flujo negativo.

### d) Ordenamiento completo: PROMETHEE II

Para cada alternativa  $a_i$  se define el flujo neto de superación, a partir del balance entre los flujos positivos y negativos. Cuanto mayor sea el flujo neto, mejor será la alternativa.

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad \text{Ecuación 19}$$

El ordenamiento completo del PROMETHEE II se define como (Fernández Barberis, 2002):

$$\begin{cases} aP^II b \Leftrightarrow \phi(a) > \phi(b) \\ aI^II b \Leftrightarrow \phi(a) = \phi(b) \end{cases} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde P es preferencia; I es indiferencia.

## 4.2. Evaluación de tecnologías para destrucción de SAO y HFC

En esta sección se presenta la aplicación del método de análisis de decisiones multicriterio a la evaluación de tecnologías para destrucción de SAO y HFC.

#### 4.2.1. Planteamiento del problema

El problema que se pretende resolver es la clasificación de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC, para determinar las más recomendables para ser implementadas en Colombia.

Para definir las tecnologías que se van a comparar o alternativas, se realizó una selección previa con los siguientes criterios:

- Únicamente se evalúan tecnologías aprobadas por el Protocolo de Montreal para destrucción de SAO (Tabla 3-2).
- No se evalúan tecnologías para destrucción de sustancias bromadas o halones, ya que no se requieren en Colombia.
- Únicamente se evalúan tecnologías aplicables a fuentes concentradas, es decir que se excluye la tecnología de incineración en residuos sólidos municipales.
- Se excluyen las tecnologías que no se usan a escala comercial y las que sólo se usan asociadas a las plantas de producción de fluoro químicos, ya que en Colombia no hay producción de estas sustancias.
- Únicamente se evalúan las tecnologías que han sido recomendadas para aprobación o tienen un alto potencial para la destrucción de HFC.
- De las ocho tecnologías seleccionadas inicialmente se eliminaron el reactor térmico poroso y la reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, ya que no se encontraron datos técnicos suficientes en la literatura consultada.

Las tecnologías seleccionadas para la evaluación se incluyen en la Tabla 4-4.

**Tabla 4-4. Tecnologías para la destrucción de SAO y HFC incluidas en la evaluación**

	Tecnología	Fuentes concentradas		Alternativa
		CFC, HCFC	HFC	
Oxidación térmica (Incineración)	Horno cementero	Aprobada	Alto potencial	A1
	Reactor de craqueo	Aprobada	Alto potencial	A2
	Incineración en horno rotatorio	Aprobada	Alto potencial	A3
Plasma	Arco de plasma de argón	Aprobada	Alto potencial	A4
	Arco de plasma de nitrógeno	Aprobada	Alto potencial	A5
	Arco de plasma de nitrógeno (portátil)	Aprobada	Alto potencial	A6
Conversión (no incineración)	Reactor de vapor sobrecalentado	Aprobada	Alto potencial	A7

Fuente: Elaboración propia

Se incluyen dos opciones para la tecnología de arco de plasma con nitrógeno, considerando que en la revisión documental se encontró que existen instalaciones fijas y móviles de destrucción con esta tecnología. En varios documentos se plantea la tecnología de plasma de nitrógeno portátil como una opción viable para los países en desarrollo, sin embargo, otros documentos y testimonios de Unidades Ozono de países de la región de Latinoamérica plantean que no es viable debido a su alto costo, su alto consumo energético y la dificultad para conseguir los insumos requeridos para su funcionamiento (Serpa, 2021).

## 4.2.2. Criterios de evaluación

Se realizó la evaluación de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC considerando de manera integrada tres grupos de criterios: técnicos, ambientales y económicos. En la Tabla 4-5 se incluyen los tres grupos de criterios seleccionados para la evaluación.

**Tabla 4-5. Criterios para evaluación de las tecnologías**

<b>Criterios</b>	<b>Unidades</b>
<b>Criterios técnicos</b>	
Capacidad de destrucción SAO/HFC	Kg/h
Consumo energético	kWh/kg CFC
Limitaciones técnicas	-
DRE	%
<b>Criterios ambientales</b>	
PCDD/PCDF	ng-ITEQ/Nm <sup>3</sup>
HCl/Cl <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>
HF	mg/Nm <sup>3</sup>
Material Particulado (PST)	mg/Nm <sup>3</sup>
CO	mg/Nm <sup>3</sup>
<b>Criterios económicos</b>	
Costo de inversión	\$US/kg CFC
Costo de destrucción	\$US/kg CFC
Disponibilidad de tecnología local	-
Complejidad	-

Fuente: Elaboración propia

## 4.2.3. Formulación del modelo de decisión multicriterio

La evaluación de las alternativas se realizó en dos etapas. La primera etapa corresponde a la comparación de las alternativas para cada uno de los grupos de criterios de forma separada.

La segunda etapa integra los resultados de la etapa anterior, con el propósito de obtener una clasificación global de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC en función de los criterios técnicos, ambientales y económicos, que pueda ser utilizada como referente para la toma de decisiones para la implementación de estas tecnologías en Colombia.

### a) Estimación de los vectores de peso de los criterios

Se utilizó el método AHP para la estimación de los vectores de peso de los criterios, siguiendo la metodología explicada en el numeral 4.4.1.

La valoración de la importancia relativa de los criterios se realizó con base en los datos de la revisión de literatura, incluyendo información del Grupo de Evaluación Tecnológica y Económica del Protocolo de Montreal, y con base en la experiencia y criterios de expertos.

La Tabla 4-6 corresponde a la matriz de comparación y el vector de pesos para la evaluación integrada de los criterios técnicos, económicos y ambientales.

**Tabla 4-6. Matriz de comparación y vector de pesos para la evaluación integrada**

CRITERIOS	Técnicos	Económicos	Ambientales	Vector de pesos
Técnicos	1	1/3	1/4	0,12262
Ambientales	4	2	1	0,55714
Económicos	3	1	1/2	0,32024

RC= 0,010651 < 0,1; Matriz consistente

El resultado de la estimación de pesos de los criterios muestra que los criterios ambientales predominan sobre los criterios económicos y los criterios técnicos.

Los criterios técnicos tienen la menor importancia, considerando que la evaluación se realizó únicamente para tecnologías de destrucción de SAO/HFC aprobadas por el Protocolo de Montreal que en principio cumplen con los criterios de referencia de desempeño técnico (Tabla 3-1). La metodología de comparación planteada permite definir cuál es la mejor alternativa, entre una serie de alternativas que ya cumplen con los mínimos requeridos.

La Tabla 4-7 a la corresponde a la matriz de comparación y el vector de pesos para los criterios técnicos.

**Tabla 4-7. Matriz de comparación y vector de pesos para criterios técnicos**

CRITERIOS	Capacidad de destrucción	Consumo energético	Limitaciones técnicas	DRE	Vector de pesos
Capacidad de destrucción	1	1/3	2	2	0,24187
Consumo energético	3	1	3	2	0,45004
Limitaciones técnicas	1/2	1/3	1	1/2	0,11744
DRE	1/2	1/2	2	1	0,19065

RC= 0,065199 < 0,1; Matriz consistente

A partir del vector de pesos de los criterios técnicos se concluye que el consumo energético es el criterio técnico más importante, seguido de la capacidad de destrucción, la eficiencia de destrucción y remoción (DRE) y por último las limitaciones técnicas de las tecnologías.

En este caso, la DRE tiene menor importancia, considerando que todas las tecnologías evaluadas cumplen con el criterio mínimo de destrucción y remoción (99,99%).

La Tabla 4-8 corresponde a la matriz de comparación y el vector de pesos para los criterios ambientales.

**Tabla 4-8. Matriz de comparación y vector de pesos para criterios ambientales**

CRITERIOS	PCDD/PCDF	HCl/Cl <sub>2</sub>	HF	Material Particulado (PST)	CO	Vector de pesos
PCDD/PCDF	1	3	3	5	5	0,46052
HCl/Cl <sub>2</sub>	1/3	1	2	3	2	0,20700
HF	1/3	1/2	1	3	2	0,15899
Material Particulado (PST)	1/5	1/3	1/3	1	1/3	0,06140
CO	1/5	1/2	1/2	3	1	0,11209

RC= 0,049643 < 0,1; Matriz consistente

Para los criterios ambientales, el vector de estimación de pesos muestra que el criterio más importante es la emisión de dioxinas y furanos (PCDD/PCDF), seguido de la emisión de HCl y HF y en los últimos lugares se encuentran la emisión de CO y material particulado.

La Tabla 4-9 corresponde a la matriz de comparación y el vector de pesos para los criterios económicos.

**Tabla 4-9. Matriz de comparación y vector de pesos para criterios económicos**

CRITERIOS	Costo de inversión	Costo de destrucción	Disponibilidad de tecnología local	Complejidad	Vector de pesos
Costo de inversión	1	1/3	1/2	1/3	0,11514
Costo de destrucción	3	1	1/2	2	0,29230
Disponibilidad de tecnología local	2	2	1	2	0,37974
Complejidad	3	1/2	1/2	1	0,21282

RC= 0,091133 < 0,1; Matriz consistente

Entre los criterios económicos, el criterio considerado más importante en la evaluación es la disponibilidad de la tecnología a nivel local, dado que para las tecnologías que ya se encuentran instaladas únicamente se considerarían los costos de adecuación, que normalmente son inferiores a los costos de instalación.

En segundo lugar, se encuentra el costo de destrucción, ya que de este dependerá que los residuos de SAO y HFC sean efectivamente enviados a destrucción y no sean emitidos a la atmósfera.

En tercer lugar, se encuentra la complejidad de la tecnología y en último lugar el costo de inversión.

Los pesos de los criterios económicos están influenciados por experiencias de otros países de la región en la implementación de tecnologías de destrucción que tienen un menor costo de inversión pero que no han logrado funcionar efectivamente, debido a la complejidad y altos costos de operación de la tecnología, así como a los altos costos y la dificultad de conseguir localmente los insumos para su funcionamiento, como las tecnologías de arco de plasma (Morita & Shiratori, 2021; Serpa, 2021).

## **b) Clasificación de las alternativas**

Una vez obtenidos los vectores de pesos de los criterios, se aplicó el método PROMETHEE II, explicado en el numeral 4.1.2, para establecer la clasificación de las alternativas de acuerdo con su desempeño técnico, económico y ambiental, y de manera global.

Los valores de los criterios para cada una de las alternativas se tomaron del Anexo A. Estos datos fueron normalizados con el fin de obtener valores en el mismo orden de magnitud.

El proceso de normalización se realizó con base en la Ecuación 21, entendiendo un criterio benéfico como aquel que a mayor valor genera un mayor atractivo para la alternativa y un criterio no benéfico como aquel que a menor valor genera un mayor atractivo.

$$\overline{g_{ki}} = \begin{cases} \frac{g_{ki} - \min(g_k)}{\max(g_k) - \min(g_k)}, & \text{benefico} \\ \frac{\max(g_k) - g_{ki}}{\max(g_k) - \min(g_{ki})}, & \text{no benefico} \end{cases} \quad \text{Ecuación 21}$$

El cálculo de las diferencias entre pares (Ecuación 14), se realizó con los valores normalizados. De acuerdo con la Tabla 4-3, se utilizó una función de preferencia tipo 3, en forma de V, para todos los criterios, con un valor de umbral de preferencia p=1.

$$P_k(d_k) = \begin{cases} 0, & d_k < 0 \\ d_k, & d_k \geq 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 22}$$

- **Clasificación de las alternativas según criterios técnicos**

En la Tabla 4-10 se presentan los valores de los criterios técnicos para cada una de las alternativas analizadas.

Las limitaciones técnicas consideradas incluyen limitaciones de contenido de cloro y flúor en el residuo alimentado para destrucción, la necesidad de tratamiento previo de los residuos antes de ser alimentados y la necesidad de tratamiento de los residuos generados por el proceso previo a su disposición.

**Tabla 4-10. Valores de los criterios técnicos<sup>a</sup>**

Vector Pesos		0,24187	0,45004	0,11744	0,19065
Criterio		Capacidad de destrucción <sup>b</sup>	Consumo energético	Limitaciones técnicas	DRE
Alternativa		(kg/h SAO)	(kWh/kg CFC)		(%)
A1	Horno cementero	3,5	1,86	4	99,99
A2	Reactor de craqueo	200	1,55	2	99,999
A3	Incineración en horno rotatorio	3	1,54	4	99,99
A4	Arco de plasma de argón	40	2,30	2	99,999
A5	Arco de plasma de nitrógeno	10	2,30	1	99,99
A6	Arco de plasma de nitrógeno (portátil)	2	2,30	1	99,99
A7	Reactor de vapor sobrecalentado	10	2,60	1	99,99
		Benéfico	No benéfico	No benéfico	Benéfico

<sup>a</sup> Valores tomados del Anexo A de este documento.

<sup>b</sup> Se tomó la menor capacidad de destrucción reportada para cada tecnología

Fuente: Elaboración propia

Para asignar valores cuantitativos a las descripción cualitativa de las limitaciones técnicas se usó una adaptación de la escala fundamental del método AHP, como se puede ver en la Tabla 4-11.

**Tabla 4-11. Escala numérica para valoración de limitaciones técnicas**

Escala Numérica	Definición
1	Sin limitaciones
3	Limitaciones moderadas
5	Limitaciones importantes
7	Limitaciones muy importantes.
9	Limitaciones de Importancia extrema
2,4,6,8	Representan situaciones intermedias

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4-12 se incluye la descripción cualitativa de las limitaciones técnicas de cada alternativa, tomadas de las Tabla 3-3, Tabla 3-4 y Tabla 3-5, y su respectiva valoración cuantitativa, de acuerdo con la Tabla 4-11.

**Tabla 4-12. Valoración de limitaciones técnicas para las alternativas evaluadas**

Alternativa	Limitaciones técnicas	
	Descripción	Valoración
<b>A1</b> Horno cementero	Máx. 0,015 % flúor en alimento Máx. 0,25 % cloro en alimento	7
<b>A2</b> Reactor de craqueo	Tratamiento previo SAO (Remoción de aceite) Fuente económica de hidrógeno in situ.	4
<b>A3</b> Incineración en horno rotatorio	Máx. 1 % flúor en alimento	6
<b>A4</b> Arco de plasma de argón	Tratamiento previo SAO (Remoción de aceite) Tratamiento gases ácidos salida Requiere un sistema robusto de suministro de energía eléctrica y alta capacidad de generación de vapor	5
<b>A5</b> Arco de plasma de nitrógeno	Tratamiento gases ácidos salida	3
<b>A6</b> Arco de plasma de nitrógeno (portátil)	Tratamiento gases ácidos salida	3
<b>A7</b> Reactor de vapor sobrecalentado	Tratamiento gases ácidos salida	3

Fuente: Elaboración propia

Los valores de los criterios técnicos presentados en la Tabla 4-10 se normalizaron usando la Ecuación 21 y posteriormente, se realizó el cálculo de las diferencias, la función de preferencias, el índice de preferencia agregada y los flujos positivos, negativos y netos, de acuerdo con el método PROMETHEE II descrito en el numeral 4.1.2.

En la Tabla 4-13 se presentan los flujos de superación de salida, de entrada y neto, así como la clasificación de las alternativas evaluadas, de acuerdo con los criterios técnicos.

**Tabla 4-13. Flujos y clasificación para los criterios técnicos**

Alternativa	Flujo de salida $\phi^+$	Flujo de entrada $\phi^-$	Flujo neto	Clasificación
<b>A1</b> Horno cementero	0,146176	0,246292	-	<b>4</b>
<b>A2</b> Reactor de craqueo	0,674049	0,015387	0,658661	<b>1</b>
<b>A3</b> Incineración en horno rotatorio	0,264792	0,172862	0,091930	<b>2</b>
<b>A4</b> Arco de plasma de argón	0,229697	0,204813	0,024884	<b>3</b>
<b>A5</b> Arco de plasma de nitrógeno	0,074539	0,246325	-	<b>5</b>
<b>A6</b> Arco de plasma de nitrógeno	0,070161	0,253349	-	<b>6</b>
<b>A7</b> Reactor de vapor sobrecalentado	0,053310	0,373696	-	<b>7</b>

Fuente: Elaboración propia

El resultado de esta evaluación indica que la tecnología con mejor desempeño a partir de los criterios técnicos es el reactor de craqueo, seguido del horno rotatorio y el arco de plasma de argón.

- **Clasificación de las alternativas según criterios ambientales**

En la Tabla 4-14 se presentan los valores de los criterios ambientales para cada una de las alternativas analizadas.

**Tabla 4-14. Valores de los criterios ambientales<sup>a</sup>**

Vector Pesos		0,46052	0,20700	0,15899	0,06140	0,11209
Criterio		PCDD/PCDF	HCl/Cl <sub>2</sub>	HF	MP (PST)	CO
Alternativa		(ng-ITEQ/Nm <sup>3</sup> )	(mg/Nm <sup>3</sup> )	(mg/Nm <sup>3</sup> )	(mg/Nm <sup>3</sup> )	(mg/Nm <sup>3</sup> )
A1	Horno cementero	0,1	0,05	0,4	10	100
A2	Reactor de craqueo	0,1	100	0,1	10	50
A3	Incineración en horno rotatorio	0,1	2,8	0,5	10	50
A4	Arco de plasma de argón	0,025	1,7	0,23	10	96
A5	Arco de plasma de nitrógeno	0,044	2,1	0,6	9	26
A6	Arco de plasma de nitrógeno (portátil) <sup>b</sup>	0,044	2,1	0,6	9	26
A7	Reactor de vapor sobrecalentado	0,041	2,95	0,81	9 <sup>c</sup>	11
		No benéfico	No benéfico	No benéfico	No benéfico	No benéfico

<sup>a</sup> Valores tomados del Anexo A de este documento.

<sup>b</sup> Se tomaron los valores reportados en general para la tecnología de arco de plasma con nitrógeno.

<sup>c</sup> Este dato no se encontró en la literatura, dada la naturaleza de la tecnología, se asumió un valor igual al menor valor de los valores reportados para emisión de material particulado para las tecnologías evaluadas.

Fuente: Elaboración propia

Al igual que con los criterios técnicos, estos valores fueron normalizados y se aplicó el método PROMETHEE II, para calcular los flujos de salida, de entrada y flujo neto, y establecer la clasificación de las alternativas de acuerdo con los criterios ambientales. Estos resultados se presentan en la Tabla 4-15.

**Tabla 4-15. Flujos y clasificación para los criterios ambientales**

Alternativa	Flujo de salida $\phi^+$	Flujo de entrada $\phi^-$	Flujo neto $\phi$	Clasificación
A1 Horno cementero	0,072398	0,371570	-0,299172	6
A2 Reactor de craqueo	0,114946	0,503781	-0,388834	7
A3 Incineración en horno rotatorio	0,072788	0,331260	-0,258472	5
A4 Arco de plasma de argón	0,387065	0,102662	0,284403	1
A5 Arco de plasma de nitrógeno	0,295327	0,070174	0,225153	2
A6 Arco de plasma de nitrógeno	0,295327	0,070174	0,225153	2
A7 Reactor de vapor sobrecalentado	0,320904	0,109134	0,211770	4

Fuente: Elaboración propia

Este análisis arroja como resultado que la tecnología con mejor desempeño a partir de los criterios ambientales es el arco de plasma de argón, seguido del arco de plasma con nitrógeno y, en tercer lugar, el reactor de vapor sobrecalentado.

No es posible definir a partir de los criterios ambientales una diferencia entre una instalación fija y un equipo portátil de destrucción de SAO y HFC con arco de plasma de nitrógeno.

- **Clasificación de las alternativas según criterios económicos**

En la Tabla 4-16 se presentan los valores de los criterios económicos para cada una de las alternativas analizadas.

**Tabla 4-16. Valoración de los criterios económicos<sup>a</sup>**

Vector Pesos		0,24187	0,45004	0,11744	0,19065
Criterio		Costo de inversión	Costo de destrucción <sup>b</sup>	Disponibilidad local	Complejidad
Alternativa		\$US/(kg/h CFC)	\$US/kg		
<b>A1</b>	Horno cementero	1000 <sup>c</sup>	4	3	3
<b>A2</b>	Reactor de craqueo	9600	6	7	6
<b>A3</b>	Incineración en horno rotatorio	5000 <sup>c</sup>	5	3	3
<b>A4</b>	Arco de plasma de argón	150000	4	9	5
<b>A5</b>	Arco de plasma de nitrógeno	150000	6	9	4
<b>A6</b>	Arco de plasma de nitrógeno (portátil)	30000	25	9	4
<b>A7</b>	Reactor de vapor sobrecalentado	30000	3	9	1
		No benéfico	No benéfico	No benéfico	No benéfico

<sup>a</sup> Valores tomados del Anexo A de este documento.

<sup>b</sup> Para cada tecnología, se tomó el mayor valor del rango reportado en el Anexo A.

<sup>c</sup> Costo de adecuación de una instalación ya existente.

Fuente: Elaboración propia

El criterio de disponibilidad de tecnología considera si las tecnologías evaluadas ya se encuentran implementadas en el país o por el contrario es necesario importarlas, lo cual implicaría mayores costos.

El criterio de complejidad considera los requerimientos de algunas tecnologías de contar con personal especializado para asistencia técnica y mantenimiento de los equipos, así como la disponibilidad de insumos, factores que influyen en los costos de la implementación de una tecnología.

Para asignar valores cuantitativos a los criterios de disponibilidad a nivel local y complejidad de las tecnologías se usó en cada caso una adaptación de la escala fundamental del método AHP, como se puede ver en la Tabla 4-17 y Tabla 4-18.

**Tabla 4-17. Escala numérica para valoración de la disponibilidad de la tecnología**

Escala Numérica	Definición
1	Disponible sin limitaciones
3	Disponible con limitaciones moderadas
5	Disponible con limitaciones importantes
7	Disponible con limitaciones muy importantes.
9	No disponible
2,4,6,8	Representan situaciones intermedias

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4-18. Escala numérica para valoración de la complejidad de la tecnología**

Escala Numérica	Definición
1	Baja complejidad
3	Complejidad moderada
5	Alta complejidad
7	Muy alta complejidad
9	Complejidad extrema
2,4,6,8	Representan situaciones intermedias

Fuente: Elaboración propia

Al igual que con los criterios técnicos y ambientales, los valores de los criterios económicos se normalizaron y se aplicó el método PROMETHEE II para calcular los flujos de superación de salida, de entrada y flujo neto, así como para establecer la clasificación de las alternativas evaluadas, de acuerdo con los criterios ambientales. Estos resultados se presentan en la Tabla 4-19.

**Tabla 4-19. Flujos y clasificación para los criterios económicos**

Alternativa	Flujo de salida $\phi^+$	Flujo de entrada $\phi^-$	Flujo neto $\phi$	Clasificación
A1 Horno cementero	0,487482	0,016624	0,470858	1
A2 Reactor de craqueo	0,220805	0,202025	0,018780	4
A3 Incineración en horno rotatorio	0,440546	0,075599	0,364947	2
A4 Arco de plasma de argón	0,019273	0,463804	-0,444531	7
A5 Arco de plasma de nitrógeno	0,116279	0,272441	-0,156161	5
A6 Arco de plasma de nitrógeno (portátil)	0,052192	0,424133	-0,371941	6
A6 Reactor de vapor sobrecalentado	0,275307	0,157259	0,118048	3

Fuente: Elaboración propia

La evaluación de las tecnologías con base en los criterios económicos arroja como resultado que la tecnología con mejor desempeño económico es el horno cementero, seguido de la incineración en horno rotatorio y el reactor de vapor sobrecalentado.

Es importante tener en cuenta que estos resultados consideran que los hornos cementeros y rotatorios ya se encuentran instalados en el país y únicamente se requiere su adecuación para cumplir con los requisitos técnicos para la destrucción de SAO y HFC. La clasificación de las tecnologías basada en los criterios económicos varía cuando se consideran los costos de instalación desde cero de los hornos cementeros y rotatorios.

- **Clasificación integrada de las alternativas**

Para realizar la integración de los criterios técnicos, ambientales y económicos y generar una clasificación global de las alternativas, se usó el flujo neto estimado en las etapas anteriores, que representa el desempeño de las alternativas en función de cada grupo de criterios.

En la Tabla 4-20 se resumen los flujos netos para cada una de las alternativas y el peso relativo de los criterios técnicos, ambientales y económicos.

**Tabla 4-20. Flujos netos y pesos relativos para la evaluación integrada**

Vector Pesos		0,12262	0,55714	0,32024
Alternativa		Criterios técnicos	Criterios ambientales	Criterios económicos
A1	Horno cementero	-0,100116	0,486314	-0,299172
A2	Reactor de craqueo	0,658661	0,034235	-0,388834
A3	Incineración en horno rotatorio	0,091930	0,380402	-0,258472
A4	Arco de plasma de argón	0,024884	-0,429076	0,284403
A5	Arco de plasma de nitrógeno	-0,171786	-0,140706	0,225153
A6	Arco de plasma de nitrógeno (portátil)	-0,183188	-0,464673	0,225153
A7	Reactor de vapor sobrecalentado	-0,320386	0,133504	0,211770
		Benéfico	Benéfico	Benéfico

Fuente: Elaboración propia

Siguiendo la metodología establecida, los valores de los flujos netos se normalizaron con base en la *Ecuación 21*. Teniendo en cuenta que a mayor flujo neto mejor será la alternativa, para el proceso de normalización todos los criterios son benéficos.

Por último, se aplicó el método PROMETHEE II para calcular de nuevo los flujos de salida, de entrada y flujo neto, así como para establecer la clasificación global de las alternativas evaluadas, que tiene en cuenta de manera integrada los criterios técnicos, ambientales y económicos.

Los resultados obtenidos y la clasificación final de las tecnologías se presentan en la Tabla 4-21.

**Tabla 4-21. Clasificación integrada de las alternativas de destrucción de SAO y HFC**

Alternativa	Flujo de salida $\phi^+$	Flujo de entrada $\phi^-$	Flujo neto $\phi$	Clasificación
A1 Horno cementero	0,211251	0,323670	-0,112418	6
A2 Reactor de craqueo	0,160063	0,425785	-0,265722	7
A3 Incineración en horno rotatorio	0,204248	0,290919	-0,086670	5
A4 Arco de plasma de argón	0,294849	0,185196	0,109653	3
A5 Arco de plasma de nitrógeno	0,263260	0,126258	0,137002	2
A6 Arco de plasma de nitrógeno	0,228418	0,220357	0,008060	4
A6 Reactor de vapor sobrecalentado	0,304277	0,094182	0,210096	1

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.4. Escenario de evaluación 2: Variación del peso de los criterios

Se planteó un segundo escenario de evaluación de las tecnologías, en el que se invirtieron los pesos de los criterios ambientales y económicos, como se muestra en la Tabla 4-22.

**Tabla 4-22. Matriz de comparación y vector de pesos – Escenario de evaluación 2**

CRITERIOS	Técnicos	Económicos	Ambientales	Vector de pesos
Técnicos	1	1/34	1/3	0,12262
Ambientales	3	1/2	1	0,32024
Económicos	4	1	2	0,55714

RC= 0,022297 < 0,1; Matriz consistente

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos y la clasificación final de las tecnologías para el escenario 2, se presentan en la Tabla 4-23.

**Tabla 4-23. Clasificación integrada de las alternativas de destrucción de SAO y HFC - Escenario de evaluación 2**

Alternativa	Flujo de salida $\phi^+$	Flujo de entrada $\phi^-$	Flujo neto $\phi$	Clasificación
A1 Horno cementero	0,347332	0,195590	0,151742	2
A2 Reactor de craqueo	0,207277	0,303419	-0,096141	5
A3 Incineración en horno rotatorio	0,309171	0,179171	0,130000	3
A4 Arco de plasma de argón	0,179569	0,311378	-0,131809	6
A5 Arco de plasma de nitrógeno	0,192775	0,189101	0,003674	4
A6 Arco de plasma de nitrógeno	0,132509	0,351932	-0,219423	7
A6 Reactor de vapor sobrecalentado	0,275208	0,113251	0,161957	1

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.5. Análisis de resultados

Para el primer escenario, en el que los criterios ambientales tienen un peso mayor que los criterios económicos, en la Tabla 4-24 se presenta el resumen de los resultados obtenidos con la evaluación de las alternativas con base en cada uno de los grupos de criterios (técnicos, ambientales y económicos) y la evaluación integrada.

**Tabla 4-24. Clasificación final de las alternativas de destrucción de SAO y HFC – Escenario 1**

Vector Pesos	0,12262	0,55714	0,32024	
Alternativa	Clasificación			Evaluación Integrada
	Criterios técnicos	Criterios ambientales	Criterios económicos	
A1 Horno cementero	4	6	1	6
A2 Reactor de craqueo	1	7	4	7
A3 Incineración en horno rotatorio	2	5	2	5
A4 Arco de plasma de argón	3	1	6	3
A5 Arco de plasma de nitrógeno	5	2	5	2
A6 Arco de plasma de nitrógeno (portátil)	6	2	7	4
A7 Reactor de vapor sobrecalentado	7	4	3	1

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, la tecnología con mejor desempeño técnico es el reactor de craqueo, mientras que la tecnología con mejor desempeño ambiental es el arco de plasma de argón y la tecnología con mejor desempeño económico es el horno cementero.

Sin embargo, el resultado de la evaluación integrada de los criterios técnicos, ambientales y económicos sugiere que la tecnología más recomendada para el país para la destrucción de SAO y HFC es el reactor de vapor sobrecalentado, seguida de las tecnologías de arco de plasma de nitrógeno (instalaciones fijas) y arco de plasma de argón.

Como se explicó en el numeral 4.2.1, entre las siete alternativas seleccionadas se incluyeron dos opciones para la tecnología de arco de plasma con nitrógeno: instalaciones fijas e instalaciones portátiles. De acuerdo con los resultados obtenidos, para los criterios técnicos y económicos, así como en la clasificación final, las instalaciones fijas de arco de plasma de nitrógeno tienen un mejor desempeño que las instalaciones portátiles, lo cual se considera un resultado lógico, considerando que las instalaciones fijas tienen mayor capacidad de destrucción y un menor costo de destrucción por kg de SAO, entre otras consideraciones que se tuvieron en cuenta en la evaluación.

Estos resultados coinciden con experiencias reportadas en países de la región, como Ecuador y Argentina, donde los equipos portátiles de arco de plasma de nitrógeno no han funcionado de manera adecuada y por lo tanto se ha requerido optar por otras soluciones para la destrucción de SAO, como la adecuación de hornos cementeros.

En el segundo escenario los criterios económicos tienen un peso mayor que los criterios ambientales. Los resultados obtenidos en la evaluación integrada de los criterios técnicos, ambientales y económicos sugieren de nuevo que la tecnología más recomendada para el país para la destrucción de SAO y HFC es el reactor de vapor sobrecalentado, seguida de las tecnologías de horno cementero e incineración en horno rotatorio.

En la Tabla 4-25 se presenta el resumen de los resultados obtenidos con la evaluación de las alternativas con base en cada uno de los grupos de criterios (técnicos, ambientales y económicos) y la evaluación integrada para el escenario 2.

**Tabla 4-25. Clasificación final de las alternativas de destrucción de SAO y HFC – Escenario 2**

Vector Pesos		0,12262	0,32024	0,55714	Clasificación
		Criterios técnicos	Criterios ambientales	Criterios económicos	
<b>A1</b>	Horno cementero	4	6	1	2
<b>A2</b>	Reactor de craqueo	1	7	4	5
<b>A3</b>	Incineración en horno rotatorio	2	5	2	3
<b>A4</b>	Arco de plasma de argón	3	1	6	6
<b>A5</b>	Arco de plasma de nitrógeno	5	2	5	4
<b>A6</b>	Arco de plasma de nitrógeno (portátil)	6	2	7	7
<b>A7</b>	Reactor de vapor sobrecalentado	7	4	3	1

Fuente: Elaboración propia

## 5. IDENTIFICACIÓN DE OPORTUNIDADES DE INVESTIGACIÓN

Para completar el objetivo general de este trabajo el objetivo se realizó una encuesta con el fin de identificar algunas posibilidades de investigación, relacionadas con la destrucción de las SAO y HFC en Colombia.

Se elaboró un cuestionario de ocho preguntas con el propósito de identificar un posible potencial de investigación en Colombia, relacionado con tecnologías para la destrucción de Sustancias controladas por el Protocolo de Montreal (SAO y HFC), el cual se incluye en el Anexo B.

El cuestionario fue enviado a las universidades que cuentan con departamentos de ingeniería química y ambiental, con el apoyo del Consejo Profesional de Ingeniería Química - CPIQ.

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación de la encuesta.

Se obtuvieron respuestas de 11 docentes de la facultad de ingeniería de 7 universidades, a nivel nacional. En la Tabla 5-1 se listan las universidades que participaron en la encuesta.

**Tabla 5-1. Universidades participantes en la encuesta sobre tecnologías de destrucción de SAO y HFC**

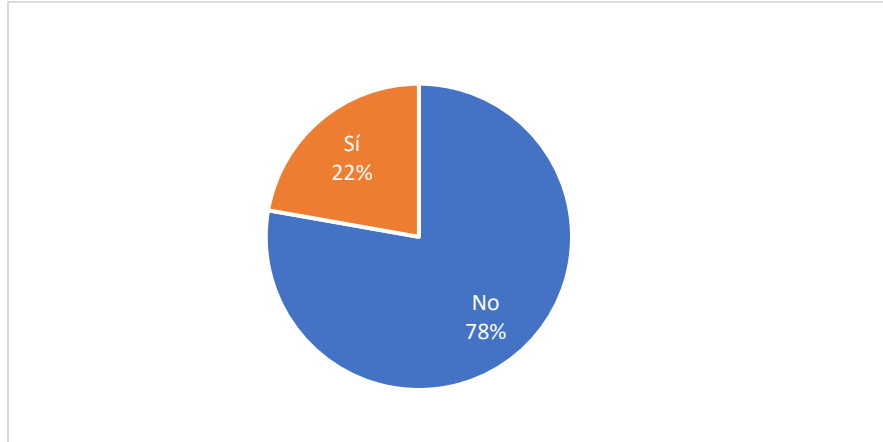
Universidad	Facultad/Departamento
La Sabana	Ingeniería
UNAD	ECBTI
Universidad Nacional de Colombia	Ingeniería/Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
La Salle	Ingeniería
La Salle	Ingeniería
Universidad Autónoma del Caribe	Departamento de Ciencias Básicas
Universidad Autónoma del Caribe	Ciencias Básicas
Universidad Autónoma del Caribe	Ingeniería Industrial
Universidad Pontificia Bolivariana	Ingeniería Química
Universidad Pontificia Bolivariana	Laboratorio de Química y Operaciones Unitarias
Fundación Universitaria del Área Andina	Ingeniería y Ciencias Básicas

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 5-1 a 5-8, se presentan los resultados de cada una de las ocho preguntas del cuestionario.

**Figura 5-1. Resultados pregunta No. 1**

1. ¿Conoce alguna investigación realizada en su universidad relacionada con las tecnologías de destrucción de CFC, HCFC o HFC?



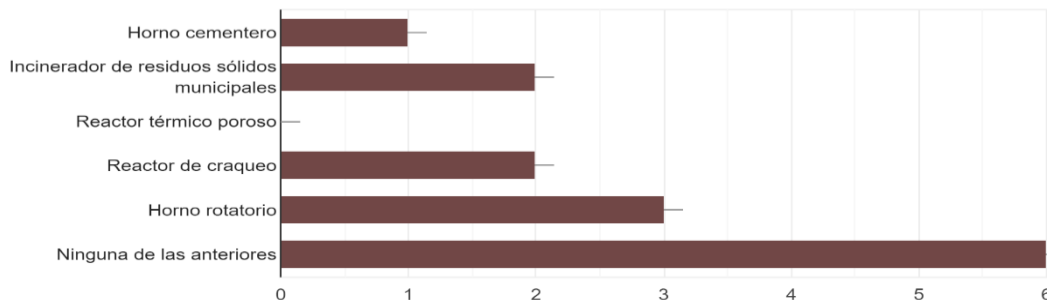
De acuerdo con la Figura 5-1, únicamente el 22 % de las universidades que participaron en la encuesta tiene conocimiento de alguna investigación realizada por la universidad relacionada con las tecnologías de destrucción de SAO y HFC.

Las universidades que han realizado investigaciones relacionadas con las tecnologías de destrucción de SAO y HFC son la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá y la Universidad La Salle de Bogotá.

**Figura 5-2. Resultados pregunta No. 2**

2. ¿Ha realizado proyectos de investigación relacionados con alguna de las siguientes tecnologías de incineración?

11 respuestas



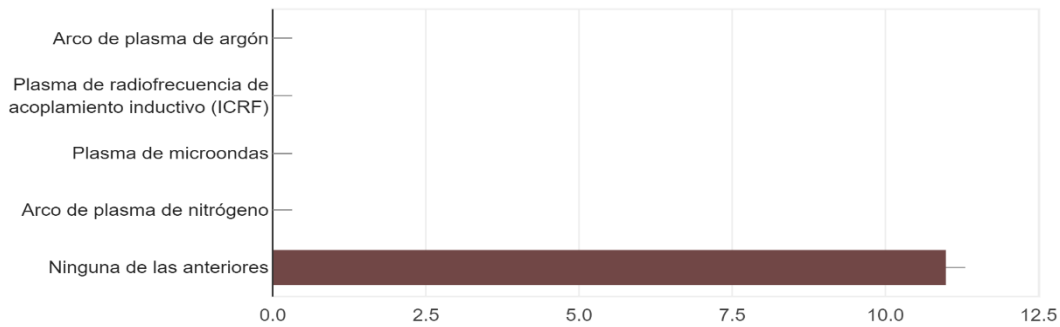
De acuerdo con la Figura 5-2, 3 de los 11 docentes encuestados (27%) han realizado proyectos de investigación relacionados con hornos rotatorios, 2 (18%) han realizado proyectos relacionados con reactores de craqueo, 2 (18%) han realizado proyectos relacionados con incineradores de residuos sólidos municipales y 1 (9%) ha realizado

proyectos relacionados con hornos cementeros. Ninguna universidad ha realizado proyectos relacionados con reactores térmicos porosos.

**Figura 5-3. Resultados pregunta No. 3**

3. ¿Ha realizado proyectos de investigación relacionados con alguna de las siguientes tecnologías de arco de plasma?

11 respuestas

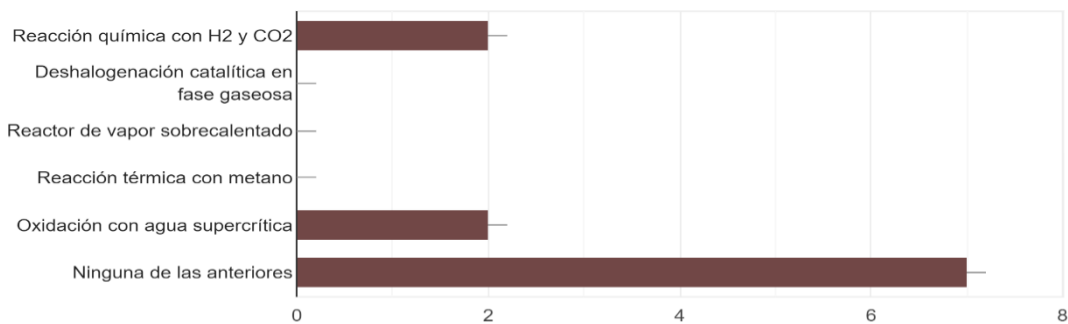


De acuerdo con la Figura 5-3, ninguno de los docentes encuestados ha realizado proyectos de investigación relacionados con tecnologías de arco de plasma.

**Figura 5-4. Resultados pregunta No. 4**

4. ¿Ha realizado proyectos de investigación relacionados con alguna de las siguientes tecnologías de conversión?

11 respuestas

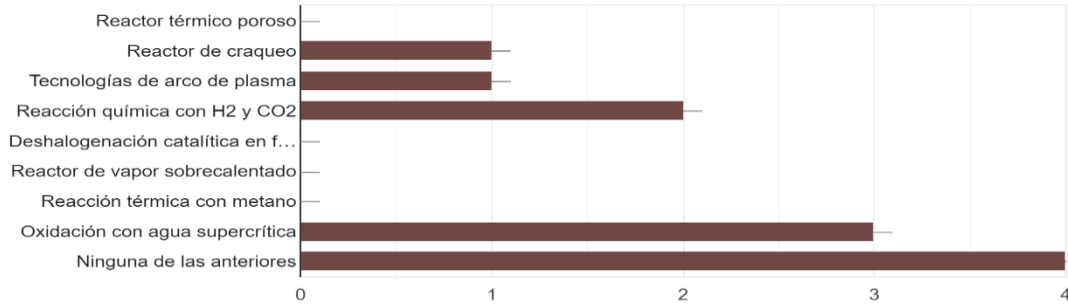


De acuerdo con la Figura 5-4, 2 de los 11 docentes encuestados (18%) han realizado proyectos de investigación relacionados con reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, y 2 (18%) han realizado proyectos relacionados con oxidación con agua supercrítica. Ninguno de los encuestados ha realizado proyectos relacionados con reactores deshalogenación catalítica en fase gaseosa, reactores de vapor sobrecalentado, o reacciones térmicas con metano.

**Figura 5-5. Resultados pregunta No. 5**

5. De las siguientes tecnologías ¿conoce alguna que se esté implementando a escala piloto en el país?

11 respuestas

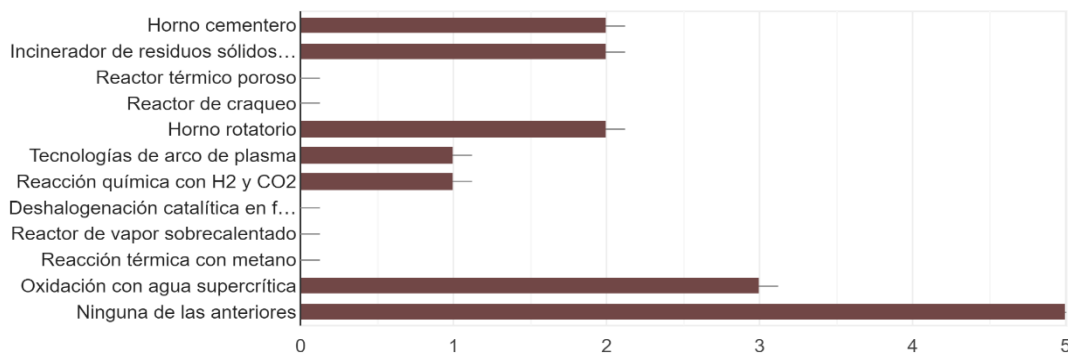


En la Figura 5-5, se puede ver que, de acuerdo con los encuestados, en el país se están implementando proyectos piloto relacionados con reactores de craqueo, tecnologías de arco de plasma, reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, y oxidación con agua supercrítica. No se están implementando a escala piloto ningún proyecto relacionado con deshalogenación catalítica, reactores de vapor sobrecalentado, o reacción térmica con metano.

**Figura 5-6. Resultados pregunta No. 6**

6. De las siguientes tecnologías ¿conoce alguna que se esté implementando a escala comercial en el país?

11 respuestas



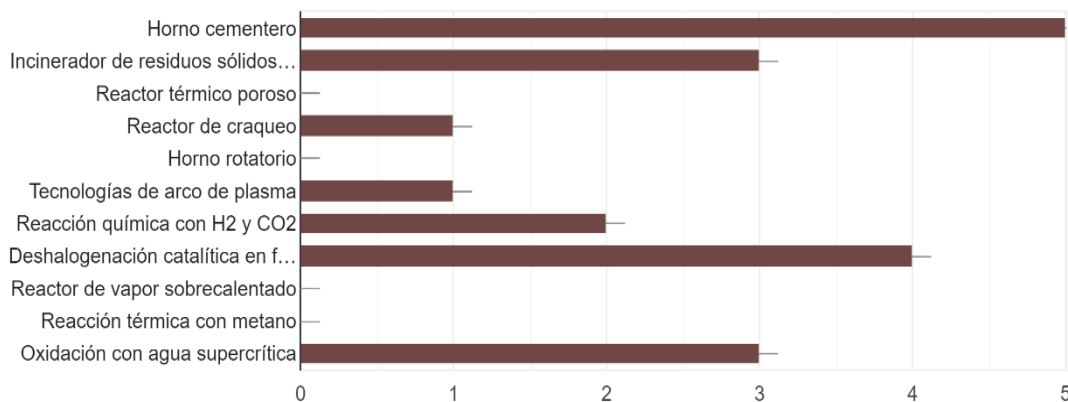
En la Figura 5-6 se puede ver que, de acuerdo con los encuestados, en el país se están implementando a escala comercial las siguientes tecnologías: horno cementero, incinerador de residuos sólidos municipales, horno rotatorio, arco de plasma, reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, y oxidación con agua supercrítica. No se están implementando a nivel comercial ningún proyecto relacionado con reactores térmicos porosos, reactores de craqueo,

deshalogenación catalítica en fase gaseosa, reactores de vapor sobrecalentado, o reacción térmica con metano.

**Figura 5-7. Resultados pregunta No. 7**

7. De las siguientes tecnologías ¿Cuáles considera que tienen un potencial de investigación y desarrollo tecnológico para destrucción de SAO y HFC en el país?

11 respuestas



De acuerdo con la Figura 5-7, los encuestados consideran que en Colombia el mayor potencial de investigación y desarrollo tecnológico relacionado con la destrucción de SAO y HFC es para los hornos cementeros, en segundo lugar se encuentra la deshalogenación catalítica en fase gaseosa, en tercer lugar la incineración de residuos sólidos municipales y la oxidación con agua supercrítica, en cuarto lugar la reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> y en quinto lugar las tecnologías de arco de plasma y los reactores de craqueo.

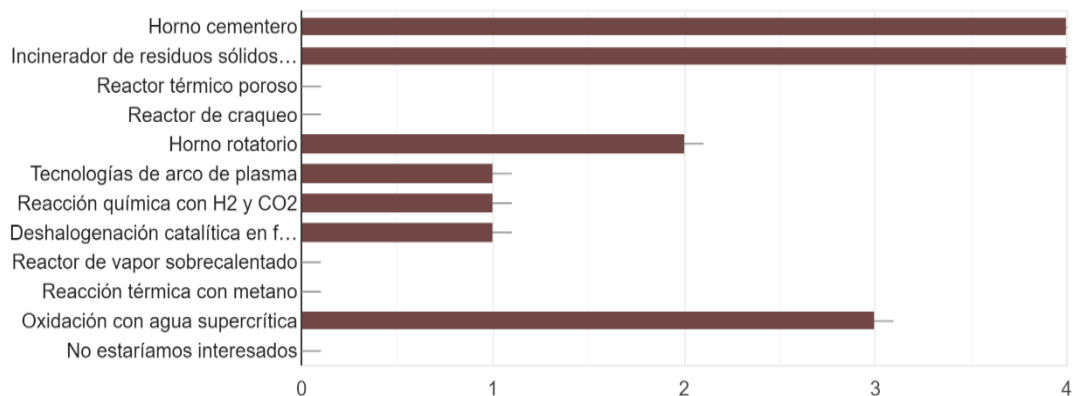
Los docentes encuestados no consideran que exista un potencial de investigación y desarrollo tecnológico para las siguientes tecnologías: reactor térmico poroso, horno rotatorio, reactor de vapor sobrecalentado y reacción térmica con metano.

Finalmente, de acuerdo con la Figura 5-8, los docentes encuestados están interesados en realizar proyectos de investigación relacionados con las siguientes tecnologías de destrucción de SAO y HFC, en orden de importancia: hornos cementeros, incineración de residuos sólidos municipales, oxidación con agua supercrítica, hornos rotatorios, reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, arco de plasma y deshalogenación catalítica en fase gaseosa (las tres últimas alternativas tienen el mismo interés para los encuestados).

**Figura 5-8. Resultados pregunta No. 8**

8. Bajo las condiciones que su facultad o departamento tiene actualmente ¿estarían interesados en adelantar investigación en algunas de las siguientes tecnologías de destrucción de SAO y HFC ?

11 respuestas



## 6. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo es describir el estado del arte de las tecnologías de destrucción de las sustancias agotadoras de la capa de ozono – SAO, a nivel internacional y analizar su aplicabilidad en Colombia.

Teniendo en cuenta la reciente aprobación de la enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal en el 2016 y su ratificación en Colombia en 2019, también se incluyó y analizó información relacionada con las tecnologías para la destrucción de los HFC.

El trabajo presentado incluyó la estimación de la cantidad de sustancias que estarán disponibles para destrucción en los próximos años en Colombia, mediante el análisis de los bancos de SAO y HFC, y la revisión documental para establecer el estado del arte de la implementación de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC a nivel internacional y nacional. La información recopilada se usó para identificar algunas barreras para la implementación de estas tecnologías en Colombia; así como para la evaluación de las tecnologías de destrucción de SAO y HFC en función de criterios técnicos, ambientales y económicos. Por último, se identificaron algunas posibilidades de investigación relacionadas con la destrucción de las SAO y HFC en el país

A partir de las diferentes capítulos presentadas en este documento, se puede concluir:

- Bancos de SAO y HFC:
  - A partir de los bancos de SAO efectivamente disponibles para disposición estimados por la Unidad Técnica Ozono y GIZ, se plantearon tres escenarios (BAU, aumento de tasa de recolección de equipos de RAC y aumento en la tasa de recolección de equipos de RAC con regeneración de refrigerantes). Con base en los escenarios de estimación de bancos de SAO y HFC, se concluye que para el año 2030 se requerirá contar con instalaciones para destrucción de SAO y HFC con una capacidad estimada entre 100 y 215 t/año (17 a 36 kg/h), suponiendo que el horno rotatorio de alta temperatura que ya fue adecuado se encuentre funcionando con una capacidad de incineración de 50 t/año de SAO.
  - Adicionalmente, de acuerdo con los escenarios planteados, se estima que para el 2030 los bancos de sustancias efectivamente disponibles para disposición corresponderán principalmente a HFC (95%), por lo que se hace necesario que el país analice cuáles son las opciones tecnológicas que podrían ser implementadas en un futuro cercano para la destrucción de HFC.
- Estado del arte de las tecnologías de destrucción de las SAO y HFC:
  - De las 14 tecnologías aprobadas por el Protocolo de Montreal para destrucción de fuentes concentradas de SAO, para la destrucción de HFC han sido recomendadas para aprobación 2 tecnologías de incineración, 9 tecnologías se considera que tienen un alto potencial y 3 tecnologías aún no han sido evaluadas.
  - Para el año 2018 existían a nivel mundial cerca de 155 plantas de destrucción de SAO en 28 países, siendo Japón el país con el mayor número de plantas de destrucción de fluorocarbonos.

- Las principales tecnologías usadas actualmente para la destrucción de SAO y HFC a nivel mundial son la incineración con residuos en hornos rotatorios de alta temperatura, la destrucción en hornos cementeros y la reacción con vapor sobrecalentado.
  - Las tecnologías de plasma prácticamente desaparecieron en Japón, debido a su complejidad y su alto costo de operación. Aunque existen instalaciones de arco de plasma en países como Australia, Estados Unidos, México y Brasil, la literatura revisada sugiere que en países en desarrollo como Colombia el uso de tecnologías de plasma no es viable, debido a su alto costo, su alto consumo energético y la dificultad para conseguir los insumos requeridos para su funcionamiento.
  - Los reactores de vapor sobrecalentado son ampliamente usados en Japón, por gestores de residuos, proveedores de gases, empresas de mantenimiento del sector RAC y proveedores especializados de fluorocarburos, lo que permite suponer que esta tecnología es de fácil instalación y puede ser usada incluso por personal no especializado.
  - Existen tecnologías muy eficientes para la destrucción de SAO y HFC como la incineración de inyección líquida y la oxidación de gases/humos que están asociadas a los fabricantes de productos fluorados y por lo tanto no disponibles a escala comercial.
  - A nivel internacional, el costo medio de destrucción de SAO se estima para fuentes concentradas entre 4 y 6 US/kg para refrigerantes o agentes espumantes y entre 6 y 8 US/kg para halones. En general, la destrucción con tecnologías de incineración tiene un costo más bajo que la destrucción con tecnologías de arco de plasma.
  - En Colombia, se realizó la adecuación de un horno rotatorio de incineración a alta temperatura que se utiliza para la incineración comercial de residuos peligrosos para la destrucción de SAO (CFC y HCFC) como fuente concentrada y fuente diluida (espumas de poliuretano). La capacidad estimada del horno está en el rango de 25 a 50 t/año de SAO. La instalación aún no ofrece la destrucción comercial de SAO, se espera que entre en funcionamiento en 2022.
  - Para la selección de la tecnología de destrucción de SAO y HFC en Colombia es necesario cumplir con los límites de emisiones establecidos por la legislación nacional (Resolución 909 de 2008, Minambiente), además de los criterios establecidos por el Protocolo de Montreal.
- Barreras tecnológicas y ambientales para la implementación de tecnologías de destrucción de SAO y HFC en Colombia:
    - Se identificaron las barreras políticas, técnicas, económicas, sociales y de información, para la implementación de tecnologías de destrucción de SAO y HFC en Colombia.
    - La inclusión de los residuos de CFC, HCFC y HFC entre los residuos permitidos en el tratamiento térmico en instalaciones de incineración de residuos y/o desechos peligrosos y hornos cementeros que realicen coprocesamiento, mediante la Resolución 2267 de 2018 de Minambiente, permitió superar la principal barrera política identificada.
    - Las principales barreras técnicas identificadas son la baja tasa de recuperación de los equipos y productos que contienen las SAO y HFC al final de su vida útil, la baja tasa de recuperación de las SAO y HFC de los equipos de RAC y extinción de incendios en las labores de mantenimiento y reparación, y la necesidad de transferencia de conocimientos y capacitación inicial por parte de expertos internacionales para la

implementación de las tecnologías de destrucción, lo cual se traduce en costos adicionales para la implementación.

- Las barreras sociales identificadas incluyen el desconocimiento por parte de la población general de los peligros ambientales que representan las SAO, así como la resistencia de la población a tener cerca instalaciones que pueden servir para la destrucción de los residuos peligrosos, como los hornos incineradores o los hornos cementeros.
  - Por último, se identificaron barreras relacionadas con la dificultad para conseguir información nacional sobre inventarios nacionales de bancos o residuos de SAO o HFC, así como sobre inventarios y capacidad de instalaciones de destrucción de residuos peligrosos.
  - Entre los mecanismos para superar las barreras, se identificó la implementación de proyectos demostrativos y proyectos piloto, que apoyen técnica y económicamente la introducción de nuevas tecnologías para la destrucción de SAO y HFC en Colombia, así como la implementación de medidas regulatorias que promuevan el incremento de la tasa de recuperación de SAO y HFC y restrinjan la emisión de estas sustancias a la atmósfera.
- Evaluación de las tecnologías de destrucción de las SAO y HFC:
    - Para la evaluación de las tecnologías se empleó el análisis de decisiones con criterios múltiples (MCDA), que permite seleccionar la mejor opción entre las siete tecnologías evaluadas, analizando de manera conjunta los criterios técnicos, ambientales y económicos.
    - El proceso de evaluación se realizó aplicando una metodología híbrida AHP-PROMETHEE. El método AHP se usó para estimar las importancias relativas de los criterios y el método PROMETHEE para clasificar las tecnologías según su desempeño en los aspectos técnicos, ambientales, económicos y de manera integrada.
    - De acuerdo con la evaluación realizada, la tecnología con mejor desempeño técnico es el reactor de craqueo, mientras que la tecnología con mejor desempeño ambiental es el arco de plasma de argón y la tecnología con mejor desempeño económico es el horno cementero.
    - En el primer escenario de evaluación, donde los criterios ambientales predominan sobre los criterios económicos y los criterios técnicos, el resultado de la evaluación integrada sugiere que la tecnología más recomendada para el país para la destrucción de SAO y HFC es el reactor de vapor sobrecalentado, seguida de las tecnologías de arco de plasma de nitrógeno (instalaciones fijas) y arco de plasma de argón.
    - En el segundo escenario de evaluación, en el que los criterios económicos tienen una mayor importancia relativa que los criterios ambientales, el resultado de la evaluación integrada sugiere de nuevo que la tecnología más recomendada para el país para la destrucción de SAO y HFC es el reactor de vapor sobrecalentado, seguida de las tecnologías de horno cementero e incineración en horno rotatorio.
    - En ambos escenarios, las instalaciones fijas de arco de plasma de nitrógeno tienen un mejor desempeño que las instalaciones portátiles, debido principalmente a que las instalaciones fijas tienen mayor capacidad de destrucción y un menor costo de destrucción por kg de SAO.

- Al comparar los resultados de ambos escenarios se observa que las tecnologías de plasma tienen un mejor desempeño ambiental que las tecnologías de incineración, sin embargo, sus alto costo hace que su implementación sea poco atractiva. Desde el punto de vista económico, la evaluación sugiere que es mejor considerar la destrucción de las SAO y los HFC en hornos cementerios o rotatorios.
- Identificación de posibilidades de investigación en Colombia, relacionadas con la destrucción de las SAO y los HFC:
  - Únicamente dos de las universidades que participaron en la encuesta han realizado proyectos relacionados con las tecnologías de destrucción de SAO y HFC.
  - Los docentes encuestados han realizado proyectos de investigación relacionados con las siguientes tecnologías: hornos rotatorios, reactores de craqueo, incineradores de residuos sólidos municipales, hornos cementeros, reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, y oxidación con agua supercrítica.
  - De acuerdo con los encuestados, en el país se están implementando proyectos piloto relacionados con reactores de craqueo, tecnologías de arco de plasma, reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, y oxidación con agua supercrítica.
  - De acuerdo con los encuestados, en el país se están implementando a escala comercial las siguientes tecnologías: horno cementero, incinerador de residuos sólidos municipales, horno rotatorio, arco de plasma, reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, y oxidación con agua supercrítica.
  - Los encuestados consideran que en Colombia el mayor potencial de investigación y desarrollo tecnológico relacionado con la destrucción de SAO y HFC es para los hornos cementeros, seguido de la deshalogenación catalítica en fase gaseosa, la incineración de residuos sólidos municipales (aplica únicamente para fuentes diluidas) y la oxidación con agua supercrítica.
  - Los docentes encuestados están interesados en realizar proyectos de investigación relacionados con las siguientes tecnologías de destrucción de SAO y HFC, en orden de importancia: hornos cementeros, incineración de residuos sólidos municipales (aplica únicamente para fuentes diluidas), oxidación con agua supercrítica, hornos rotatorios, reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, arco de plasma y deshalogenación catalítica en fase gaseosa.

## 7. RECOMENDACIONES

A partir del trabajo realizado y de los resultados obtenidos, se recomienda:

- Realizar reuniones con grupos focales para la validación de los criterios seleccionados, así como de los resultados finales de la evaluación.
- Ampliar la base de expertos para la valoración de la importancia relativa (pesos) de los criterios usados para la evaluación.
- De acuerdo con los resultados de la evaluación multicriterio el reactor de vapor sobrecalentado es la tecnología que tendría un mejor desempeño global (técnico, ambiental y económico) para la destrucción de SAO y HFC en el país. Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda realizar estudios adicionales que permitan profundizar en el conocimiento de esta tecnología y den pautas para su posible implementación en el país.
- Trabajar con las universidades en la difusión de las diferentes tecnologías que pueden ser implementadas y proponer proyectos de investigación relacionados con la implementación de reactores de vapor sobrecalentado para la destrucción de SAO y HFC en Colombia.
- La literatura consultada muestra que en algunos países desarrollados se usan alternativas adicionales a las aprobadas por el Protocolo de Montreal para la destrucción de HFC. Estas tecnologías son propuestas luego para evaluación y aprobación (si cumplen los criterios de referencia) por parte del TEAP. Se recomienda ampliar el conjunto de alternativas sobre las cuales se realicen análisis y proyectos de investigación, para incluir otras tecnologías para la destrucción de HFC, por ejemplo, las tecnologías que han sido probadas o que están siendo investigadas para la destrucción de PCB.
- Debido a la dificultad de conseguir información para otros sectores, el análisis de los bancos de SAO y HFC se realizó únicamente para el sector de refrigeración y acondicionamiento del aire, que representa el 90% del consumo de SAO y HFC en Colombia. Se recomienda ampliar la información e incluir los sectores de espumas de poliuretano y extinción de incendios, y ajustar la estimación de la capacidad instalada requerida por el país para la destrucción de estas sustancias.
- En este trabajo se evaluaron únicamente las tecnologías aprobadas por el Protocolo de Montreal para destrucción de fuentes concentradas de SAO, se recomienda extender el análisis para comparar las dos tecnologías aprobadas para la destrucción de fuentes diluidas (espumas que contienen SAO).

## GLOSARIO

**Bancos de SAO:** Cantidad total de sustancias contenidas en equipos existentes, reservas químicas, agentes espumantes y demás productos que aún no se han liberado a la atmósfera (IPCC/TEAP, 2005).

**Bancos de SAO potencialmente disponibles para la gestión:** Cantidad de SAO que pueden recuperarse cuando los productos y equipos entran en el flujo de residuos.

**Bancos de SAO efectivamente disponibles para la gestión:** La diferencia entre los bancos potencialmente disponibles y los bancos efectivamente disponibles está dada por las tasas de recuperación y la eficacia del sistema de recolección de cada país.

**Contaminantes orgánicos persistentes (COP):** Grupo de sustancias o familias de sustancias orgánicas que presentan en forma combinada características de toxicidad, persistencia, bioacumulación y capacidad de transportarse a largas distancias desde donde se transmitieron o utilizaron (gestión respel).

**Eficiencia de destrucción (Destruction Efficiency – DE):** medida de qué tan completamente una tecnología destruye un contaminante de interés. Se determina restando de la masa de una sustancia química introducida en un sistema de destrucción durante un período de tiempo específico la masa de esa sustancia química que se libera en los gases de la chimenea, las cenizas volantes, el agua del lavador, las cenizas de fondo y cualquier otro residuo del sistema, y expresando esa diferencia como un porcentaje de la masa de la sustancia química introducida en el sistema (UNEP, 2018a).

**Eficiencia de destrucción y remoción (Destruction and Removal Efficiency – DRE):** La DRE se determina restando de la masa de una sustancia química introducida en un sistema de destrucción durante un período de tiempo determinado, la masa de esa sustancia química que se libera en los gases de chimenea y expresando esa diferencia como un porcentaje de la masa de la sustancia química introducida en el sistema (UNEP, 2018a).

**Eficiencia de recuperación y destrucción (Recovery and Destruction Efficiency - RDE):** está dada por la cantidad de la sustancia química destruida en el sistema de destrucción como porcentaje de la presente in situ antes del inicio del sistema de destrucción. Esta medida incluye las pérdidas en la segregación, el desmantelamiento, la recuperación mecánica y la incineración u otro tipo de destrucción (UNEP, 2018a).

**Potencial de Agotamiento de Ozono:** relación del impacto sobre el ozono que posee una sustancia química comparada con el impacto de una masa igual de CFC-11. El PAO del CFC-11 es definido como 1, mientras que otros CFC y HCFC tienen PAO en el intervalo entre 0,01 y 1,0 (Salawithc et al., 2019).

**Potencial de calentamiento atmosférico:** valor relativo que expresa qué tanta radiación infrarroja atrapa en la atmósfera un determinado GEI, relativa a la atrapada por el CO<sub>2</sub> (IDEAM et al., 2016). Teniendo en cuenta que los tiempos de vida media atmosférica de las sustancias juegan un papel importante en los valores del PCA, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático acordó usar los valores de PCA basados en un tiempo de 100 años.

**Sustancias recalcitrantes:** Sustancias que tienden a permanecer por mayor tiempo en el ambiente. No son biodegradables bajo condiciones ambientales naturales.

**Unidades Dobson (UD):** unidad para medir la columna de ozono total. Una unidad Dobson (UD) equivale a 0,01 mm de espesor de capa de ozono, en condiciones normales de presión y de temperatura (1 atm y 0 °C, respectivamente). Expresado en número de moléculas, una UD representa la existencia de  $2,69 \times 10^{16}$  moléculas/cm<sup>2</sup>. Los valores típicos de ozono total en la atmósfera varían entre 200 y 500 UD, con un promedio de 300 UD (Salawithc et al., 2019).

**Vida media atmosférica:** Tiempo requerido para remover o convertir químicamente cerca del 60% de un gas presente en la atmósfera (IDEAM, n.d.).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benavides Ballesteros, H. O., & León Aristizabal, G. E. (2004). *El ozono*.
- Benavides Ballesteros, H. O., & León Aristizabal, G. E. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. In *Ideam*. <https://doi.org/IDEAM-METEO/008-2007>
- Brans, J.-P., & Mareschal, B. (2005). Promethee Methods. In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*.
- CTOC. (2015). *Chemicals Technical Options Committee (CTOC) 2014 Assessment Report* (Issue June). Ozone Secretariat. [http://ozone.unep.org/Assessment\\_Panels/TEAP/Reports/CTOC/](http://ozone.unep.org/Assessment_Panels/TEAP/Reports/CTOC/)
- Fernández Barberis, G. (2002). Los Métodos Promethee: Una Metodología de Ayuda a la Toma de Decisiones Multicriterio Discreta. *Rect@: Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 1, 5–27.
- GIZ. (2015). *Management and destruction of existing ozone depleting substances banks* (Issue August). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- GIZ. (2018). *Global Roadmap on ODS bank management 2.0*.
- GIZ. (2019). *Guía para el desarrollo de un inventario de Bancos de SAO*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- ICF. (2008). *Study on the Collection and Treatment of Unwanted Ozone- Depleting Substances in Article 5 and Non-Article 5 Countries*. May, 220.
- ICF. (2009). *ODS Destruction in teh United States of America and abroad*. Prepared by ICF International for U.S. EPA's Stratospheric Protection Division (Issue May). [https://unep.ch/ozone/data\\_reporting/USA-Decision-XX-7-ODS-Destruction.pdf](https://unep.ch/ozone/data_reporting/USA-Decision-XX-7-ODS-Destruction.pdf)
- ICF. (2018). *ODS Destruction in the United States and Abroad Prepared by ICF International for the U.S. Environmental Protection Agency* (Issue February).
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2018). *Segundo Reporte Bienal de Actualización de Colombia ante la CMNUCC*. 180. [www.minambiente.gov.co](http://www.minambiente.gov.co); [www.co.undp.org](http://www.co.undp.org)
- IDEAM. (n.d.). *Relación entre las SAO y el sistema climático*. Retrieved October 20, 2019, from <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima//relacion-entre-las-sao-y-el-sistema-climatico>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2016). *Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero - Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*.
- IPCC/TEAP. (2005). *Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons. Technical Summary*.

- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2015). Cambio Climático 2014: Informe de síntesis / Resumen para responsables de políticas. In *Cambio Climático 2014: Informe de síntesis*. [https://doi.org/10.1016/S1353-8020\(09\)70300-1](https://doi.org/10.1016/S1353-8020(09)70300-1)
- Knox, A. (2005). *An Overview of Incineration and EFW Technology as Applied to the Management of Municipal Solid Waste (MSW)*.
- Midwest Refrigerants. (2017). *Groundbreaking Fluorocarbon Conversion Technology Advances under Montreal Protocol. Press Release*. 1–2. [http://www.midwestrefrigerants.com/MWR-UNDP\\_PRESS\\_RELEASE\\_12-6-17.pdf](http://www.midwestrefrigerants.com/MWR-UNDP_PRESS_RELEASE_12-6-17.pdf)
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). *Resolución 909 de 2008*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Manual para la Gestión Integral de Bifenilos Policlorados - PCB. No. 6. Manejo ambientalmente racional de equipos y desechos contaminados con PCB* (Issue 6).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *Buenas prácticas ambientales en el mantenimiento, recarga y uso de extintores portátiles con HCFC-123*.
- Moreno Jimenez, J. M. (2002). El proceso analítico jerárquico ( AHP ). Fundamentos, metodología y aplicaciones. In *Toma de decisiones con criterios múltiples* (pp. 21–53).
- Morita, Y., & Shiratori, T. (2021). Key Drivers behind the Development of Fluorocarbons Destruction Infrastructure: A Case Study of Japan. *Journal of Sustainable Development*, 14(2), 27. <https://doi.org/10.5539/jsd.v14n2p27>
- Moustakas, K., Fatta, D., Malamis, S., Haralambous, K., & Loizidou, M. (2005). *Demonstration plasma gasification / vitrification system for effective hazardous waste treatment*. 123, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.03.038>
- Mukherjee, A., Debnath, B., & Ghosh, S. K. (2016). A Review on Technologies of Removal of Dioxins and Furans from Incinerator Flue Gas. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 528–540. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.037>
- PEECES. (n.d.). *Programa de Eficiencia Energética Caribe Energía Sostenible - PEECES*. Retrieved August 30, 2021, from [www.caribeeeficiente.com.co](http://www.caribeeeficiente.com.co)
- PNUMA. (2019). *Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono*. (13th ed.). Secretaría del Ozono.
- Programa Nacional de Sustitución de Neveras. (n.d.). *Programa Nacional de Sustitución de Neveras - Entregala y ahorra*. Retrieved August 30, 2021, from <http://entregalayahorra.com/>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (2004). Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1), 1–35. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>.

- Salawithc, R. J., Fahey, D. W., Hegglin, M. I., McBride, L. A., Tribett, W. R., & Doherty, S. J. (2019). 20 Questions and Answers About the Ozone Layer: 2018 Update, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018. In *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018*. World Meteorological Organization.
- Serpa, R. (2021). *RRR, End-User Programme - Zero Leaks and ODS destruction*.
- Stanković, J. J., Janković-Milić, V., Marjanović, I., & Janjić, J. (2021). An integrated approach of PCA and PROMETHEE in spatial assessment of circular economy indicators. *Waste Management*, 128, 154–166.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.057>
- Tran, R., Kennedy, E. M., & Dlugogorski, B. Z. (2000). A process for conversion of Halon 1211. *University of Newcastle*.  
[https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/el/fire\\_research/R0002203.pdf](https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/el/fire_research/R0002203.pdf)
- UNFCCC. (n.d.-a). *Iniciativa HFC*. Retrieved October 30, 2020, from <https://unfccc.int/es/news/iniciativa-hfc-coalicion-para-reducir-contaminantes-climaticos-de-corta-vida>
- UNFCCC. (n.d.-b). *What is the Paris Agreement?* Retrieved October 30, 2019, from <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/what-is-the-paris-agreement>
- Unidad Técnica Ozono (UTO). (2020a). *Boletín Ozono No. 48*.
- Unidad Técnica Ozono (UTO). (2020b). *No Title*.
- United Nations Environment Program (UNEP)/Ozone Secretariat. (n.d.). *Country Data*. Retrieved August 30, 2021, from <https://ozone.unep.org/countries/data>
- United Nations Environment Program (UNEP). (2002). *Report of the Technology and Economic Assessment Panel, Volume 3B, Report of the Task Force on Destruction Technologies* (Issue April). Ozone Secretariat.
- United Nations Environment Program (UNEP). (2009). *Report of the Technology and Economic Assessment Panel, Task Force Decision XX/8 Report "Assessment of Alternatives to HCFCs and HFCs and Update of the TEAP 2005 Supplement Report Data"* (Issue May).
- United Nations Environment Program (UNEP). (2018a). *Report of the Technology and Economic Assessment Panel, Volume 2, Decision XXIX/4 TEAP Task Force Report on Destruction Technologies for Controlled Substances*. Ozone Secretariat.
- United Nations Environment Program (UNEP). (2018b). Synthesis report on the pilot ODS disposal projects (Decision 79/18(e)). In *UNEP/OzL.Pro/ExCom/82/21*.
- US EPA. (n.d.). *Ozone-Depleting Substances*. Retrieved November 14, 2019, from <https://www.epa.gov/ozone-layer-protection/ozone-depleting-substances>
- USGCRP. (n.d.). *Atmospheric Carbon Dioxide*. U.S. Global Change Research Program. Retrieved August 30, 2021, from <https://www.globalchange.gov/browse/indicators/atmospheric-carbon-dioxide>
- UTO, & GIZ. (2018). *Inventario de bancos de SAO para Colombia*.

- Wątróbski, J., Jankowski, J., Ziemia, P., Karczmarczyk, A., & Ziolo, M. (2019). Generalised framework for multi-criteria method selection. *Omega (United Kingdom)*, 86, 107–124. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.07.004>
- Yepes Piqueras, V. (n.d.). *Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP)*. Retrieved July 30, 2021, from <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/27/proceso-analitico-jerarquico-ahp/>

# **ANEXOS**

## Anexo A. Desempeño técnico y ambiental, y costos estimados para las tecnologías de destrucción de SAO y HFC

Fuente	Consumo Energía	Capacidad destrucción SAO <sup>a</sup>	Capacidad destrucción HFC	Flúor en la alimentación	Cloro en la alimentación	Temperatura de operación	Tiempo de residencia	Volumen gases de escape	DRE	PCDD/PCDF	HCl/CO <sub>2</sub>	HF	HBr/Br <sub>2</sub>	Material Particulado (PST)	CO	Costo de destrucción	Costo de inversión	Costo de operación	Estado de desarrollo	TRL
	(kWh/kg CFC)	(Kg/h)	(Kg/h)	(%)	(%)	(°C)	(s)	(Nm <sup>3</sup> /h)	(%)	(ng-ITEQ/Nm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	(mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	(mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	(mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	(mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	(mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	\$US/kg	\$US/(kg/h CFC)	\$US/año		
<b>Oxidación térmica (Incineración)</b>																				
Horno cementero																				
[1]		3,5		0,25%	0,015%	<1500	6-7	200.000	> 99,99%	0,04	0,05	0,4	-	10	100				Bajo	
[2]			10 - 50	0,25%	0,015%	<1500	<10													
[3]		4 - 50				1100 - 2000			> 99,99	0,1 - 0,05					40				Comercial	9
[4]																4,3 - 6		1000 <sup>f</sup>		
[5]	1,86					1.500			99,99	0,1						4				
[6]																6				
Oxidación de gases/humos																				
[1]		165 (CFC)				1200 (CFC)	1 - 2	1.200	> 99,999% CFC	0,032	3,2	0,5	-	22	40	3 - 5			Bajo	Comercial
[2]		15 (Halón)				1250 (Halones)			>99,99 Halón											
[5]	1,30	80				>1100	1 - 2		99,9995 HFC	0,1						5				
[5]		165							99,99											
Incineración de inyección líquida																				
[1]		11				1.350		3.200	> 99,99%		<10	<1	-		<10				Bajo	
[2]		10	22			1.249			99,995 HFC						26				Comercial	9
[5]	1,30								99,99	0,1						5				
Incineración de residuos sólidos municipales																				
[1]		6,5 - 19,5				850 - 950		60.000	> 99,99%	<1,0	300	5	-	30	10				Bajo	Comercial
[2]			10 - 120 <sup>d</sup>																	
[7]				0,01%																
Reactor térmico poroso																				
[2]		10-100				<1500													Alto	Demostrativo
Reactor de craqueo																				
[1]		200				2.000		46,5	> 99,999%	<0,01	<100	<0,1	-	<10	<50	4-6			9600	
[2]			100			1.200	2	40	>99,99%											Comercial
[5]	1,55	200				2000 - 2600			99,999	0,1						3,75				
Incineración en horno rotatorio																				
[1]				1%		1.200	2	78.500	99,9999% <sup>c</sup>	0,03 - 0,015	2,8	0,5	4	10	50	3-5			Alto	
[2]		3 - 10	10 - 200			>1100			> 99,99%											
[8]		7 - 433		1%		1.000														Comercial
[9]		3 - 5														4 - 12			Bajo <sup>f</sup>	9
[5]	1,54								99,99	0,1						6 - 6,5				
[5]																5				
<b>Plasma</b>																				
Arco de plasma de argón																				
[1]		40-60 (CFC)				2.500	>1	40	> 99,9998%	0,006	1,7	0,23	<4,0	<10	96	3 - 4			Alto	
[2]		100 (Halón)				3.000			> 99,9999%											
[8],		70 - 150	60 - 90																	
[3]		30 - 100				1800 - 2000			>99,99	0,006						7 - 9				Comercial
[6]		40 - 100				2.500			99,9994							3 - 4				
[5]	2,30	60 (CFC)				3.000			99,9999	0,025						7,5				
[10]		120 (Halón)							>99,9999							2,75				
[10]		20 - 40														5 - 20		150000		
Plasma de radiofrecuencia de acoplamiento inductivo (ICRF plasma)																				
[1]		50-80				2.000	2	20	> 99,99%	0,012	4,8	2,4	2,4	4,8	4,8				Alto	
[2]		50 - 80				2.000	2													Demostrativa
[5]	3,70					2.000			99,99	0,025						3				
Plasma de microondas																				
[1]		2				5.700		32	> 99,99%	0,0011	2,45	0,74	-	10,6	4,3				30000	Comercial
Arco de plasma de nitrógeno																				
[1]		10				1100-2200		No data	> 99,99%	0,044	2,1	0,6	-	9	26	5-6			150000	Comercial
[2]		10	20			1100-2200			> 99,99%											
[11]		65																		21500
Arco de plasma de nitrógeno (equipo portátil)																				
[2]		2	2			1.500	0,13													
[10], [11]		2							> 99,99%							>25		30000	30000 - 50000	Comercial

Fuente	Consumo Energía (kWh/kg CFC)	Capacidad destrucción SAO <sup>a</sup> (Kg/h)	Capacidad destrucción HFC (Kg/h)	Flúor en la alimentación (%)	Cloro en la alimentación (%)	Temperatura de operación (°C)	Tiempo de residencia (s)	Volumen gases de escape (Nm <sup>3</sup> /h)	DRE (%)	PCDD/PCDF (ng-ITEQ/Nm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	HCl/CO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	HF (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	HBr/Br <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	Material Particulado (PST) (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	CO (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	Costo de destrucción \$US/kg	Costo de inversión \$US/(kg/h CFC)	Costo de operación \$US/año	Estado de desarrollo	TRL		
<b>Conversión (no incineración)</b>																						
Reacción química con H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> [2] [8]		7				300 - 1000			99,99										Demostrativa	7		
Deshalogenación catalítica en fase gaseosa [1] [2] [5]	0,79	10 1				400 400 400		15 73	>99,99 99,99 99,99	<0,01	1	<0,5		2	13	5 - 7	100000 - 250000		Demostrativa	7		
Reactor de vapor sobrecalentado [1] [2] [8] [4], [11] [12]		10,1	12,4			850 850 - 1000 850-1000	0,8	33,2	>99,99 99,99	0,041	<2,95	<0,81		10	<11,3	2-3	30000	5 4,3	20000	17000 - 26000	Comercial	9
Reacción Térmica con Metano [1] <sup>e</sup>						850 - 900		156	99,9999	0,015	0,1	0,1		0,5	1,1	3 - 5				Demostrativa	7	

<sup>a</sup> Tasa de alimentación de CFC, a menos que se indique otra información.

<sup>b</sup> Los límites de emisión se expresan en masa por metro cúbico seco de gas de escape a 0 °C y 101,3 kPa, corregidos al 11% de O<sub>2</sub>.

<sup>c</sup> Las DRE superiores al 99,9999% destruyen compuestos refractarios como los PCB, el diclorobenceno y el tetraclorobenceno.

<sup>d</sup> Capacidad aplicada a la alimentación de fuentes diluidas (espumas).

<sup>e</sup> Datos para destrucción de PCB/CB.

<sup>f</sup> Costo de la adecuación de una instalación existente para destruir SAO/HFC.

## Referencias bibliográficas

- [1] United Nations Environment Program (UNEP), "Report of the Technology and Economic Assessment Panel, Volume 3B, Report of the Task Force on Destruction Technologies," Ozone Secretariat, Nairobi, 2002.
- [2] United Nations Environment Program (UNEP), "Report of the Technology and Economic Assessment Panel, Volume 2, Decision XXIX/4 TEAP Task Force Report on Destruction Technologies for Controlled Substances," Ozone Secretariat, Nairobi, Kenya, 2018.
- [3] R. G. Belisario P., "Co-procesamiento de SAO en hornos de cemento." ONUDI, Paraguay, 2011.
- [4] Ministry of the Environment of Japan, "Revised Report of The Study on ODS Disposal Options in Article 5 Countries," 2006.
- [5] IPCC/TEAP, "Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons. Technical Summary," 2005.
- [6] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), "Demonstration Project for Disposal of Unwanted ODS in Mexico," 2017.
- [7] GIZ, "Thermal destruction of ( hydro ) chloro- fluorocarbons and hydrofluorocarbons," Bonn and Eschborn, Germany, 2020.
- [8] ICF, "ODS Destruction in the United States and Abroad Prepared by ICF International for the U.S. Environmental Protection Agency," 2018.
- [9] United Nations Environment Program (UNEP), "Synthesis report on the pilot ODS disposal projects (Decision 79/18(e)), " Montreal, 2018.
- [10] R. Cooke, "Tecnologías de destrucción de SAO al FVU y estrategias de acción." Seminarios web: Cerrando el ciclo: Gestión ambientalmente reacional de las SAO y los HFC al final de la vida útil, 2021.
- [11] ICF, "Study on the Collection and Treatment of Unwanted Ozone- Depleting Substances in Article 5 and Non-Article 5 Countries," no. May, p. 220, 2008.
- [12] UNFCCC, "HFC23 Decomposition Project of Zhejiang Juhua Co., Ltd, P. R. China," 2005. [Online]. Available: <http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1135255248.44/view>.

# Anexo B. Encuesta sobre tecnologías de destrucción de SAO y HFC

## Tecnologías de destrucción de SAO y HFC

El siguiente cuestionario está enmarcado en el trabajo final de maestría "Evaluación técnica y ambiental de las tecnologías de destrucción de Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono - SAO para su posible aplicación en Colombia" realizado por parte la estudiante Angélica Antolínez Esquivel de la Maestría de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, con la dirección del Ing. Oscar Suárez Medina.

El cuestionario tiene como propósito identificar un posible potencial de investigación en Colombia, relacionado con tecnologías para la destrucción de Sustancias controladas por el Protocolo de Montreal (SAO y HFC).

Tiempo estimado de respuesta: 5 minutos

\*Obligatorio

1. Correo electrónico \*

---

Datos de contacto

2. Nombre y Apellidos \*

---

3. Universidad \*

---

4. Facultad/Departamento \*

---

5. Cargo \*

---

Cuestionario

El Protocolo de Montreal, controla la producción y consumo de las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono (SAO), entre las cuales los más reconocidos son los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), y los hidrofluorocarbonos (HFC), usados principalmente como refrigerantes, agentes espumantes y agentes extintores de incendios.

Las SAO son compuestos químicos antropogénicos que contienen bromo y cloro, y que tienen una vida atmosférica lo suficientemente larga como para ser transportados a la estratosfera, donde contribuyen a la destrucción del ozono estratosférico. Los CFC, HCFC y HFC son también potentes Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Los residuos de SAO y HFC pueden ser recuperados y posteriormente tratados para su reutilización o para su destrucción cuando no tienen valor comercial.

Las siguientes preguntas están relacionadas con las tecnologías de destrucción de CFC, HCFC y HFC aprobadas por el Protocolo de Montreal o que actualmente se encuentran en estudio.

- 
6. 1. ¿Conoce alguna investigación realizada en su universidad relacionada con las tecnologías de destrucción de CFC, HCFC o HFC? \*

Marca sólo un óvalo.

- Sí  
 No  
 Ninguna

7. 2. ¿Ha realizado proyectos de investigación relacionados con alguna de las siguientes tecnologías de incineración? \*

Selecciona todas las opciones que correspondan.

- Horno cementero  
 Incinerador de residuos sólidos municipales  
 Reactor térmico poroso  
 Reactor de craqueo  
 Horno rotatorio  
 Ninguna de las anteriores

8. 3. ¿Ha realizado proyectos de investigación relacionados con alguna de las siguientes tecnologías de arco de plasma? \*

Selecciona todas las opciones que correspondan.

- Arco de plasma de argón  
 Plasma de radiofrecuencia de acoplamiento inductivo (ICRF)  
 Plasma de microondas  
 Arco de plasma de nitrógeno  
 Ninguna de las anteriores

9. 4. ¿Ha realizado proyectos de investigación relacionados con alguna de las siguientes tecnologías de conversión? \*

Selecciona todas las opciones que correspondan.

- Reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>  
 Deshalogenación catalítica en fase gaseosa  
 Reactor de vapor sobrecalentado  
 Reacción térmica con metano  
 Oxidación con agua supercrítica  
 Ninguna de las anteriores

10. 5. De las siguientes tecnologías ¿conoce alguna que se esté implementando a escala piloto en el país? \*

*Selecciona todas las opciones que correspondan.*

- Reactor térmico poroso
- Reactor de craqueo
- Tecnologías de arco de plasma
- Reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>
- Deshalogenación catalítica en fase gaseosa
- Reactor de vapor sobrecalentado
- Reacción térmica con metano
- Oxidación con agua supercrítica
- Ninguna de las anteriores

11. 6. De las siguientes tecnologías ¿conoce alguna que se esté implementando a escala comercial en el país? \*

*Selecciona todas las opciones que correspondan.*

- Horno cementero
- Incinerador de residuos sólidos municipales
- Reactor térmico poroso
- Reactor de craqueo
- Horno rotatorio
- Tecnologías de arco de plasma
- Reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>
- Deshalogenación catalítica en fase gaseosa
- Reactor de vapor sobrecalentado
- Reacción térmica con metano
- Oxidación con agua supercrítica
- Ninguna de las anteriores

12. 7. De las siguientes tecnologías ¿Cuáles considera que tienen un potencial de investigación y desarrollo tecnológico para destrucción de SAO y HFC en el país? \*

*Selecciona todas las opciones que correspondan.*

- Horno cementero
- Incinerador de residuos sólidos municipales
- Reactor térmico poroso
- Reactor de craqueo
- Horno rotatorio
- Tecnologías de arco de plasma
- Reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>
- Deshalogenación catalítica en fase gaseosa
- Reactor de vapor sobrecalentado
- Reacción térmica con metano
- Oxidación con agua supercrítica

13. 8. Bajo las condiciones que su facultad o departamento tiene actualmente ¿estarian interesados en adelantar investigación en algunas de las siguientes tecnologías de destrucción de SAO y HFC ? \*

*Selecciona todas las opciones que correspondan.*

- Horno cementero
- Incinerador de residuos sólidos municipales
- Reactor térmico poroso
- Reactor de craqueo
- Horno rotatorio
- Tecnologías de arco de plasma
- Reacción química con H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>
- Deshalogenación catalítica en fase gaseosa
- Reactor de vapor sobrecalentado
- Reacción térmica con metano
- Oxidación con agua supercrítica
- No estaríamos interesados