

ELIMINACIÓN DE REFRIGERANTES AGOTADORES DE LA CAPA DE OZONO POR INCINERACIÓN

José Ignacio Huertas*, Helmer Acevedo**, Carol Ochoa***

RESUMEN

Existe la necesidad de encontrar métodos alternativos fácilmente replicables para disponer de las sustancias agotadoras de la capa de ozono. En respuesta a esta necesidad este trabajo propone la incineración como método de disposición final de estas sustancias.

Inicialmente se establece analíticamente la sustancia reductora más apropiada. Se concluye que la utilización de hidrógeno para la incineración es la más adecuada ya que asegura una alta eficiencia de destrucción. Adicionalmente se determinan las condiciones óptimas de operación (presión, temperatura y relación de flujos). Posteriormente se diseña y construye un incinerador tipo laboratorio con el objeto de verificar experimentalmente las conclusiones obtenidas analíticamente. La composición de los subproductos de combustión se determinó por cromatografía de gases con espectrometría de masas. Los resultados preliminares muestran que la disposición de los refrigerantes agotadores de la capa de ozono es técnicamente factible mediante incineración con hidrógeno. Se continúa trabajando en alternativas para disminuir los costos del proceso.

1. INTRODUCCIÓN

Las sustancias clorofluorocarbonadas (CFC's) son compuestos con enlaces carbono-cloro ó carbono-fluor que poseen estructuras muy estables. Se usan en forma masiva en refrigerantes y productos en forma de aerosol. Dada su estabilidad química, cuando son liberadas pueden ascender hasta la estratósfera sin sufrir modificaciones. Allí, en presencia de la luz solar, descomponen el ozono (O_3) destruyendo la capa que protege la tierra de la radiación UV. Por lo anterior la comunidad internacional, mediante la firma del protocolo de Montreal, decidió no continuar con la produc-

ción de estas sustancias y remplazarlas con sustancias más amigables con el medio ambiente.

En el caso de la industria dedicada a la refrigeración, los refrigerantes agotadores de la capa de ozono que fueron incorporados en la maquinaria industrial en los años anteriores a la firma del protocolo de Montreal, en la actualidad están siendo recuperados y remplazados por refrigerantes más amigables con el medio ambiente. Una vez recuperados y almacenados, estos compuestos pueden ser destruidos por medio de dos técnicas: oxidación térmica y reducción por plasma.[Ref. 1]

* MSc. DSc., Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de los Andes. jhuertas@uniandes.edu.co, Bogotá-Colombia.

** Estudiante de la Maestría en Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes, Bogotá.

*** Joven Investigador de COLCIENCIAS, Estudiante de la Maestría en Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes, Col.

Para muchos países, incluyendo Colombia, la única alternativa de disposición posible de los cientos de toneladas de estas sustancias recuperadas y almacenadas es la exportación para su destrucción en laboratorios especializados. Esta es la razón por la cual en la práctica los refrigerantes agotadores de la capa de ozono finalmente son liberados directamente a la atmósfera.

Por tanto existe la necesidad de encontrar nuevas alternativas de disposición de los refrigerantes agotadores de la capa de ozono, que sean de bajo costo y fácilmente replicables. En respuesta a esta necesidad el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes ha venido trabajando en desarrollar un método de disposición de refrigerantes agotadores de la capa de ozono mediante incineración. En este estudio se analiza el caso del refrigerante 12 (CCl_2F_2) como refrigerante representativo. Los demás refrigerantes agotadores de la capa de ozono pueden ser incinerados como una extensión de las conclusiones expuestas en el presente trabajo.

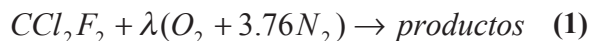
2. DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DE OPERACIÓN

Con el objeto de determinar las condiciones óptimas de incineración, se estableció analíticamente la composición de los productos de combustión resultantes al incinerar R12 a diferentes condiciones de operación (presión, temperatura del reactor y flujos de los reactivos) [Ref. 2, 3, 4]. En todos los casos se consideró que los reactantes entran a condiciones estándar ($P = 1 \text{ atm}$ y $T = 25 \text{ °C}$). Se consideraron como alternativas de agentes reductores aire e hidrogeno. Inicialmente también se consideró usar sodio. Sin embargo esta alternativa se descartó por el alto riesgo que representa la manipulación de esta sustancia.

2.1 Aire como agente reductor

Considerando que el aire es el oxidante más barato y abundante en la naturaleza, se evaluó

en primera instancia la alternativa de incinerar el refrigerante R12 con aire. La ecuación 1 muestra la reacción global a considerar.



donde λ es el porcentaje de aire usado. La figura 1 muestra la composición de equilibrio de los productos de combustión cuando el incinerador se encuentra a presión atmosférica, a diferentes temperaturas de trabajo y $\lambda=1$. Se observa que los principales subproductos son CO_2 , O_2 , ClF , ClF_2 , CF_4 , Cl_2 y F . El compuesto CF_4 se denomina tetrafluoruro de carbono (tetrafluormetano) y pertenece al grupo de sustancias llamadas fluorocarbonadas. Es una sustancia muy estable.

La figura 1 muestra que para reducir la fracción másica de CF_4 hasta el 1% bajo estas condiciones, se requiere llevar el incinerador por encima de los 1800 °C , lo cual encarece el proceso y representa un reto tecnológico. Por tanto se puede concluir que la incineración de R12 con aire requiere altas temperaturas para disminuir las concentraciones de los subproductos indeseables hasta límites aceptables.

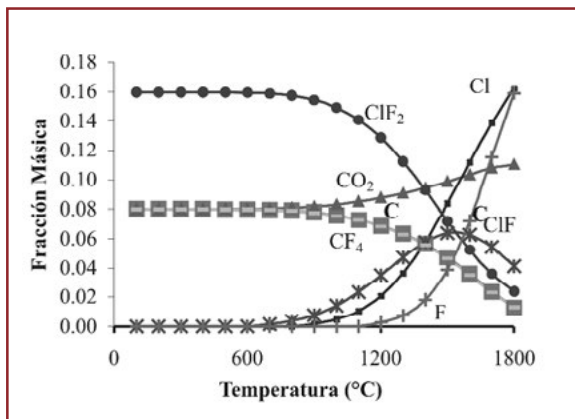
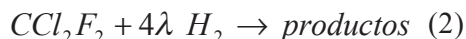


Figura 1. Subproductos de la incineración del R12 con aire como función de la temperatura del incinerador a $P=1 \text{ atm}$ y $\lambda=1$.

2.3 Hidrógeno como agente reductor

Como segunda alternativa para incinerar R12 se escogió hidrógeno por ser un compuesto que tiene afinidad con los elementos halógenos y es factible que forme hidruros con el cloro y con el flúor. La ecuación 2 muestra la reacción global a considerar.



La figura 2 muestra los principales productos de la incineración entre el R12 y el H_2 a diferentes valores de λ . Se observa que los productos de mayor concentración son HF, HCl, H_2 y CH_4 . Estos subproductos pueden ser fácilmente manipulados o dispuestos mediante tecnologías de tratamiento de gases bien conocidas y accesibles.

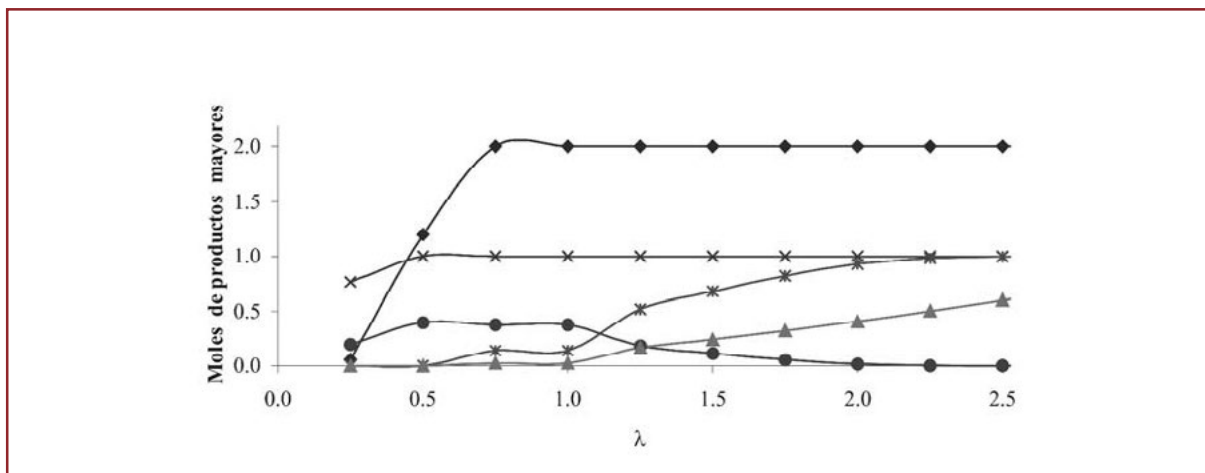


Figura 2. Productos de mayor concentración en los productos de la incineración del R12 con H_2 a diferentes λ , Temperatura adiabática y $P = 1 \text{ atm}$.

La figura 3 muestra la fracción de sustancias CFC's generadas como subproductos de la incineración de cada unidad de R12 procesada bajo condiciones adiabáticas como función de λ . La figura 4 igualmente muestra la fracción

de sustancias CFC's generadas como subproductos de la incineración de cada unidad de R12 procesada para un $\lambda=1$ y como función de la temperatura de la cámara de incineración.

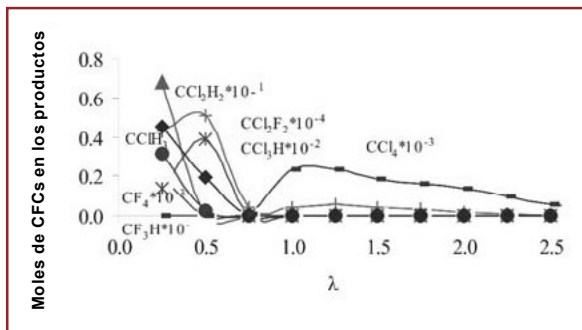


Figura 3. Moles de sustancias CFC's generadas como subproductos de la incineración de cada unidad de R12 procesada bajo condiciones adiabáticas como función de λ

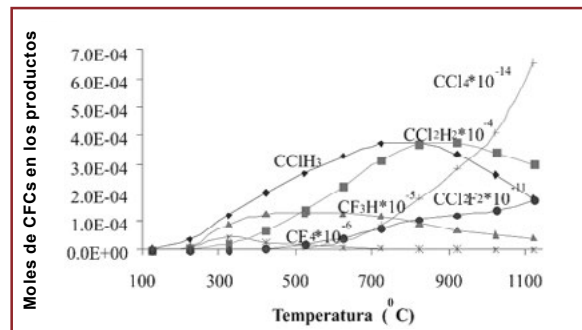


Figura 4. Moles de sustancias CFC's generadas como subproductos de la incineración de cada unidad de R12 procesada para un $\lambda=1$ y como función de la temperatura de la cámara de incineración.

Las figuras 3 y 4 muestran que se requiere de un λ cercano a 1 y una temperatura de la cámara de incineración superior a 825°C para alcanzar una eficiencia de destrucción superior al 99.99%.

Para estimar los requerimientos de energía del incinerador se calculó la temperatura adiabática de llama para el caso de $\lambda=1$. Se encontró que para este caso es de 1100°C. Esto significa que no es necesario adicionar energía al proceso para lograr la temperatura mínima de trabajo deseada ($T > 825^{\circ}\text{C}$).

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL INCINERADOR

Con el objeto de verificar experimentalmente que es factible técnicamente incinerar R12 con

hidrogeno y obtener eficiencias de destrucción superiores al 99.99%, se procedió a diseñar y construir un incinerador con las siguientes características:

- de llama por difusión y con premezcla
- flujo laminar
- tipo laboratorio

El incinerador permite controlar y cuantificar los flujos de los diferentes reactivos y la temperatura de la cámara de incineración. La figura 5 muestra el diagrama de flujo del incinerador construido.

La temperatura de la cámara de incineración es regulada mediante resistencias eléctricas y un control automático ON/OFF. El calentamiento de las líneas de conducción de los

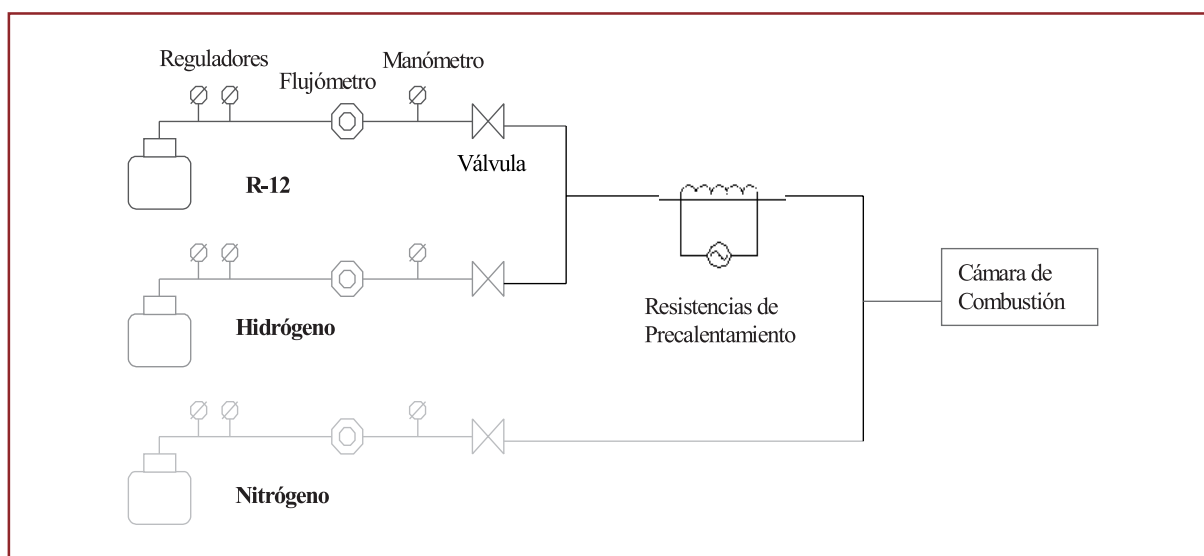


Figura 5. Ilustración de la operación del incinerador de refrigerantes agotadores de la capa de ozono.

reactivos se logra mediante el uso de resistencias eléctricas de 600 W controladas por variadores de voltaje. El orden en que los reactivos ingresan a la cámara de combustión de adentro hacia fuera es R12, H_2 , y el gas inerte. Para lograr una combustión apropiada de los reactantes se usa una primera etapa de premezcla.

El inerte utilizado en el incinerador es nitrógeno, el cual tiene por finalidad realizar la purga de aire de las tuberías por donde circulará el hidrógeno y el refrigerante e inertizar la cámara de combustión asegurando que el hidrógeno y el aire no se encuentren en concentraciones tales que puedan causar reacciones violentas. Tanto el hidrógeno como el R12 entran a la cámara de incineración a una presión de 11.7 psia y a temperatura ambiente.

4. EXPERIMENTACIÓN

Inicialmente se operó el incinerador ajustando la temperatura de la cámara de incineración a 700°C y el flujo de hidrógeno entre 0 y 2 L/min. Se ajustó la relación R12/H₂ hasta obtener una llama limpia y sin formación de condensados. La figura 6 muestra una foto del tipo de llama obtenida.



Figura 6. Ilustración del incinerador y tipo de llama obtenida en la incineración de refrigerantes agotadores de la capa de ozono.

Se tomaron lecturas indicativas de la temperatura de la llama por medio de un termopar tipo

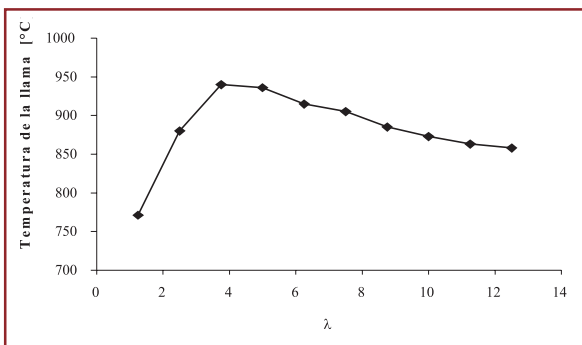


Figura 7. Lecturas indicadoras de la temperatura de la llama obtenidas en la incineración de R12 con H₂ para diferentes λ

K. La figura 7 ilustra la variación de la temperatura de la llama como función de λ . Se encontró que se obtiene 938 °C como indicador de la máxima temperatura cuando $\lambda = 3.8$ en lugar de $\lambda = 1$ como predicen los resultados analíticos. La diferencia se debe a que el diseño del quemador requiere alimentar H₂ en exceso para que haya suficiente Hidrógeno en el frente de llama.

Con el objeto de medir los niveles de concentración de los subproductos de la incineración, se tomó una muestra de los gases de combustión cuando el indicador de temperatura de la llama alcanza su máximo en $\lambda=3.8$. Esta muestra fue analizada por cromatografía de gases

con espectrómetro de masas. Los resultados preliminares muestran que las concentraciones de los subproductos indeseados están por debajo de la concentración máxima recomendada por la OSHA [Ref. 5] para una atmósfera limpia.

Actualmente se continúa trabajando en la exploración de los niveles de concentración de subproductos a porcentajes de hidrógeno menores buscando optimizar el proceso. Como alternativa para eliminar las sustancias cloradas de los productos de combustión se está implementado una etapa de lavado con agua de estos gases. Por otro lado el trabajo continúa buscando formas de reducir los costos de incineración por este método.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo propone como alternativa de disposición de las sustancias clorofluorcarbonadas la incineración con H_2 . Analíticamente se encontró que las condiciones óptimas de operación se presentan cuando la relación de flujos es cercana a la estequiométrica y la cá-

mara de incineración está por encima de los $825^{\circ}C$. Resultados experimentales preliminares muestran que la concentración de sustancias clorofluorcarbonadas generadas como subproductos de la incineración son muy bajas asegurando una alta eficiencia de destrucción. Se continúa trabajando en busca de disminuir el consumo de H_2 en el proceso y una cuantificación más adecuada de los subproductos de la incineración.

6. REFERENCIAS

1. United Nations Environment Program (UNEP). Handbook of International Treaties on the Protection of the Ozone Layer-Section 2.4-Destruction Procedures. Approved destruction processes.1992
2. JANAF. Thermochemical Tables. Standard Reference Data System. 2nd Ed.1971
3. HSC Chemistry. Ver 1.12
4. Van Wylen, Sonntag, Borgnakke. Fundamentals of Classical Thermodynamics. 4th Ed. 1994
5. OSHA. Part 1910. Occupational Safety and Health Standards. Subpart z. Toxic and Hazardous Substances. Table z-1.Limits for Air Contaminants.1993