METODOLOGIA PARA LA EVALUACION DE ALTERNATIVAS TECNOLOGICAS A LOS CFCS EN EL SECTOR DE ESPUMAS DE POLIURETANO.

Tesis Presentada
Por

VICTOR ALEJANDRO FIGUEROA GONZALEZ

Presentada Ante la Direccion Academica de la Universidad Virtual del Instituto Tecnòlogico y de Estudios Superiores de Monterrey
Comò Requisito Parcial Para Optar al Titulo de

MAESTRO EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL

Mayo de 1998

Maestria en Ciencias con Areas de Especializacion

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS A LOS CFCS EN EL SECTOR DE ESPUMAS DE POLIURETANO.

TESIS PRESENTADA
POR
VÍCTOR ALEJANDRO FIGUEROA GONZÁLEZ

Presentada ante la Dirección Académica de la Universidad Virtual del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey como requisito parcial para optar al título de

MAESTRO EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Mayo de 1998
Maestría en Ciencias con Áreas de Especialización

© Víctor Alejandro Figueroa González 1998
Todos los derechos reservados.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios y a la Virgen de Guadalupe por permitirme lograr una meta más en la vida. A mis padres y hermana por el apoyo que recibí en todo momento. A mi esposa Cecilia quien vivió conmigo los momentos difíciles de la maestría y me dio su apoyo para seguir adelante. A mi asesor Dr. Gerardo Mejía quien hizo posible el desarrollo de esta tesis y cuya asesoría fue vital para concluir este trabajo.

ÍNDICE TEMÁTICO

RESUMEN..... iv
INDICE DE TABLAS..... vi
INDICE DE FIGURAS..... ix
GLOSARIO..... x

1 ANTECEDENTES..... 1

1.1 INTRODUCCIÓN..... 1
1.2 EL PROTOCOLO DE MONTREAL..... 4
1.3 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA DE LAS ALTERNATIVAS..... 10
1.4 OBJETIVOS..... 11
1.5 ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO..... 13

2 DESCRIPCIÓN DEL SECTOR DE LA INDUSTRIA DEL POLIURETANO..... 15

2.1 IMPORTANCIA DE LA INDUSTRIA DEL POLIURETANO A NIVEL MUNDIAL..... 15
2.2 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE POLIURETANO..... 19
2.2.1 Espumas de Poliuretano Flexible..... 19
2.2.2 Espumas de Poliuretano Rígido..... 28
2.3 CONSUMO DE POLIURETANO A NIVEL MUNDIAL..... 38
2.3.1 Consumo Global de Espumas Flexibles..... 39
2.3.2 Consumo Global de Espumas Rígidas..... 41
2.4 CONSUMO EN MÉXICO..... 52
2.4.1 Importaciones y Exportaciones..... 53

3 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS..... 55

3.1 DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS: DESEMPEÑO ACTUAL. 55
3.2 DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS: ESPUMAS FLEXIBLES. 61
3.2.1 Conservación..... 61
3.2.2 Agentes Espumantes Alternativos..... 62
3.2.3 Modificaciones Químicas..... 66
3.2.4 Tecnologías de Manufactura Alternativa..... 68
3.2.5 Productos Sustitutos..... 73
3.2.6 Conclusiones..... 74
3.3 DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS: ESPUMAS RÍGIDAS..... 75

3.3.1 Refrigeradores y Hieleras..... 76
3.3.2 Otros Electrodomésticos..... 87
3.3.3 Paneles Laminados..... 91
3.3.4 Paneles Tipo Sandwich..... 96
3.3.5 Espreado..... 101
3.3.6 Otras Aplicaciones..... 103
3.3.7 Conclusiones..... 106

4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS..... 107

4.1 CLASIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SUSTITUCIÓN DE CFCs..... 107
4.1.1 Tiempo de Transición 108
4.1.2 Características de la Alternativa..... 109
4.1.3 Criterios de Clasificación Propuestos..... 110
4.1.4 Alternativas Seleccionadas..... 111
4.2 IMPACTOS ASOCIADOS AL USO DE LAS ALTERNATIVAS... 117
4.2.1 Impacto Ambiental..... 119
4.2.2 Impacto en el Desempeño de la Alternativa..... 122
4.2.3 Impacto en el Costo..... 124
4.3 MÉTODO DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS..... 132
4.3.1 Asignación de Criterios de Evaluación..... 133
4.3.2 Asignación de la Ponderación a cada Dimensión..... 134
4.3.3 Evaluación de los Indicadores Ambientales..... 135
4.3.4 Jerarquización de los Indicadores Ambientales..... 140
4.3.5 Evaluación de los Indicadores de Desempeño..... 141
4.3.6 Jerarquización de los Indicadores de Desempeño..... 146
4.3.7 Evaluación de los Indicadores Económicos..... 147
4.3.8 Jerarquización de los Indicadores Económicos..... 153
4.3.9 Evaluación de las 3 Dimensiones Ponderadas..... 160
4.3.10 Análisis del Efecto Combinado de las Ponderaciones. 161

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 164

BIBLIOGRAFÍA..... 166

RESUMEN

Con la aprobación del protocolo de Montreal muchas empresas a nivel mundial han sustituido el uso de clorofluorocarbonos (CFC's) y otras tendrán que hacerlo en el corto o mediano plazo. Existen diferentes sustitutos de los CFC's según el tipo de industria.

En México, la industria del poliuretano es importante y tendrá que buscar sustitutos de CFC's que sean lo más atractivos desde los puntos de vista económico, ambiental y de calidad. Alternativas de sustitución son el CO2, pentano, hidroclorofluorocarbonos, cloruro de metileno, entre otros . A pesar de la importancia que tendrá encontrar la alternativa de sustitución más apropiada de acuerdo a indicadores ambientales, económicos y de calidad del producto, no existe una metodología sencilla que permita a las empresas hacer una evaluación de alternativas de sustitución en forma global.

En este trabajo se desarrolló una metodología que permite a las empresas del sector de espumas de poliuretano evaluar la sustitución de sustancias destructoras de ozono bajo diferentes alternativas, basadas estas en la experiencia de empresas similares, los objetivos particulares de la empresa y las características de su entorno. En la metodología se consideran las dimensiones de impacto ambiental, económico y de calidad del producto, los cuales son importantes en el proceso de toma de decisiones. Estas dimensiones conforman el marco conceptual para la evaluación de las diferentes alternativas de sustitución. Al aplicar esta metodología se ponderan las tres dimensiones, de tal forma que la suma de las ponderaciones de 100%. Entonces se obtiene la mejor alternativa al calificar indicadores de cada una de las tres dimensiones mencionadas, y se

identifica el rango de aplicación de cada alternativa de acuerdo a la ponderación asignada a cada dimensión.

La aplicación de esta metodología se ejemplifica con dos casos y los resultados se presentan mediante diagramas de triángulo. En cada diagrama se indican las alternativas de sustitución más favorables de acuerdo a la ponderación asignada a cada una de las dimensiones. En general, estos resultados muestran que el CO2 es la alternativa de sustitución más favorable a medida que el aspecto ambiental se pondera más alto.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla **Página**

1.1 Resumen de los acuerdos a los que se llegaron con la revisión en Londres del Protocolo de Montreal..... 7

2.1 Principales aplicaciones de las espumas plásticas..... 18

2.2 Consumo de CFC en la elaboración de espumas flexibles de poliuretano de 1986 a 1993 (toneladas)..... 41

2.3 Consumo de HCFC en la elaboración de espumas flexibles de poliuretano durante 1993..... 42

2.4 Consumo global de CFC en el aislamiento de refrigeradores y hieleras durante 1993..... 43

2.5 Consumo global de HCFC en el aislamiento de refrigeradores y hieleras durante 1993..... 44

2.6 Consumo de CFCs en el subsector de electrodomésticos durante 1993..... 45

2.7 Consumo de HCFCs en el subsector de electrodomésticos durante 1993..... 46

2.8 Consumo de global de CFC en el sector de construcción de 1986 a 1993..... 46

2.9 Consumo global de HCFC en el sector de construcción durante 1993..... 48

2.10 Consumo global de CFC en el sector de elaboración de paneles laminares por capa de 1990 a 1993..... 49

2.11 Consumo global de HCFC en el sector de paneles laminados durante 1993..... 49

2.12 Consumo global de CFC en el sector de espuma espreada de 1990 a 1993..... 50

2.13 Consumo global de HCFC en el sector de espuma espreada durante 1993..... 51

2.14 Consumo global de CFC en otras aplicaciones del sector de espumas rígidas de 1990 a 1993..... 52

2.15 Consumo global de HCFC en otras aplicaciones del sector de espumas rígidas durante 1993..... 52

3.1 Alternativas disponibles para sustituir a los CFCs en el sector de espumas rígidas de poliuretano..... 60

3.2 Eficiencia energética de los diferentes sustitutos..... 82

4.1 Cálculo del costo de inversión y operación para las principales alternativas en estudio..... 126

4.2 Propiedades ambientales de los agentes espumantes seleccionados..... 136

4.3 Evaluación para el indicador Flamabilidad..... 137

4.4 Evaluación para el indicador Potencial Destructor de Ozono..... 138

4.5 Evaluación para el indicador Potencial de Calentamiento Global. 138

4.6 Evaluación de la toxicidad del compuesto..... 139

4.7 Análisis para la dimensión ambiental..... 140

4.8 Propiedades de desempeño de los agentes espumantes seleccionados..... 142

4.9 Evaluación para el indicador conductividad térmica..... 142

4.10 Evaluación para el indicador propiedades mecánicas..... 144

4.11 Evaluación para el indicador procastinación..... 145

4.12 Análisis para la dimensión de desempeño de la alternativa..... 146

4.13 Inversión promedio requerida por tipo de empresa..... 149

4.14 Prospectiva y tendencias en el costo incremental de agentes espumantes..... 150

4.15 Costos operativos incrementales con relación al CFC 11 desfasado en 1994..... 153

4.16 Jerarquización de los aspectos económicos..... 159

4.17 Jerarquización de los 3 factores ponderados..... 161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura **Página**

2.1 Consumo de CFCs en el Sector de Espumas (toneladas)..... 17

2.2 Principales aplicaciones a analizar en este estudio..... 19

2.3 Proceso de producción de espuma en trozos..... 22

2.4 Proceso de producción continuo de espuma flexible moldeada..... 24

2.5 Proceso de producción Maxfoam/Varimax..... 26

4.1 Costo incremental de agentes espumantes 1988-2010: tendencia y prospectiva..... 151

4.2 Representación triangular: Espumas Rígidas..... 162

4.3 Representación triangular: Espumas Flexibles..... 163

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- AEA- Agente Espumante Auxiliar
- CFCs- Clorofluorocarbonos
- CM- Cloruro de metileno
- COVs- Compuestos Orgánicos Volátiles
- DME- Dimetil eter
- FV- Fibras Vítreas
- HCFCs-Clorofluorocarbonos parcialmente hidrogenados
- HFCs- Hidrofluorocarbonos
- IEP- Industria de Espumas de Poliuretano
- MCF- Metilcloroformo
- MDI-Difenilmetanodiisocianato
- OMM- Organización Meteorológica Mundial
- ONUDI- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial
- PCG- Potencial de Calentamiento Global del Planeta
- PDO- Potencial Destructor de Ozono
- PESP- Poliester poliol
- PETP- Polieter poliol
- PI- Poliisocianato
- PNUD- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
- PNUMA- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
- PPM- Partes por millón

- PU- Poliuretano
- RASE- Recubrimientos, Adhesivos, Selladores y Elastómeros.
- RIM- Reacción por Inyección de Moldeo
- SDO- Sustancias Destructoras de Ozono
- TDI- Diisocianato de Tolueno

1 ANTECEDENTES

1.1 INTRODUCCIÓN

El ozono es un gas que se encuentra de manera natural en la atmósfera de la tierra, absorbiendo radiaciones ultravioleta del sol en el rango de 2,000-2270 A° [1]. La concentración de ozono varía con la altura, alcanzando su máximo en la estratosfera, a unos 25-30 km. de la superficie terrestre.[1] Esta concentración de gas se conoce como la capa de ozono, y reduce la intensidad de las radiaciones ultravioletas del sol de determinadas longitudes de onda que llegan a la superficie de la tierra. Altas dosis de radiaciones ultravioletas de dichas longitudes de onda pueden perjudicar la vista de seres humanos, causar cáncer de piel, reducir el ritmo de crecimiento de las plantas, alterar el equilibrio de los ecosistemas, acelerar la degradación de los plásticos y aumentar los riesgos de enfermedad al suprimir la eficacia del sistema de inmunidad del cuerpo.

La radiación solar puede descomponer muchos de los gases de la estratosfera que contienen cloro y bromo. Los radicales de cloro y bromo pueden poner en marcha una reacción destructiva en cadena, perjudicando a otros gases de la estratosfera, incluido el ozono. Las moléculas de ozono se descomponen al ser atacadas por átomos de cloro que son liberados de las moléculas de CFCs por el efecto de la radiación ultravioleta en el rango de longitud de onda de 2,000 a 2270 A° dando oxígeno y monóxido de cloro. El monóxido de cloro al reaccionar con oxígeno libera nuevamente un radical simple de cloro o de bromo, que puede

dar lugar a otras 100 000 reacciones similares antes de ser finalmente expulsado de la estratosfera y pasar a la troposfera. De esta forma la concentración de ozono en la estratosfera disminuye significativamente.

En 1930 la empresa Dupont introdujo los compuestos Clorofluorocarbonos (CFCs). Estos compuestos eran considerados como revolucionarios ya que sus características de aislamiento y estabilidad química los colocaba como óptimos para una gran variedad de procesos. Debido a esto, su uso se extendió a un gran número de sectores industriales.[1]

En 1974 Mario Molina y Sherwood Rowland (dos científicos de la Universidad de California en Berkeley) presentaban los resultados de su investigación con CFC11 y CFC12 ($CFCl_3$ y CF_2Cl_2 respectivamente) en donde planteaban por medio de una serie de reacciones químicas, los efectos que producen los CFCs en la capa de Ozono. [1] Los resultados del estudio mostraron evidencia de la gran acumulación de los clorofluorometanos en la estratosfera. Se estimó que la duración de estos compuestos en la estratosfera estaría en el rango de 40 a 150 años, y que con la tendencia en el uso de estos compuestos las concentraciones de CFCs se multiplicarían por un factor de 10 a 30 veces la concentración de 1974.

La aportación central del estudio fue el planteamiento de la destrucción de la capa de ozono debido a la fotodisociación de los CFCs en la estratosfera, liberando átomos de cloro, teniendo como resultado la destrucción de aproximadamente 100,000 moléculas de ozono por cada átomo de cloro liberado. Las reacciones bajo las cuales se sustenta este estudio se muestran en las ecuaciones 1.1 a 1.9.

$$O_2 + h\gamma \xrightarrow{(\lambda < 242\ nm)} 2O\cdot \quad (1.1)$$

$$O\cdot + O_2 \rightarrow O_3 \quad (1.2)$$

$$O_3 + h\gamma \xrightarrow{(242 < \lambda < 320\ nm)} O_2 + O\cdot \quad (1.3)$$

$$Cl_2CF_2 + h\gamma \xrightarrow{(200 < \lambda < 227\ nm)} Cl\cdot + ClCF_2 \quad (1.4)$$

$$Cl\cdot + O_3 \rightarrow ClO\cdot + O_2 \quad (1.5)$$

$$ClO\cdot + O\cdot \rightarrow Cl\cdot + O_2 \quad (1.6)$$

$$Cl\cdot + O_3 \rightarrow ClO\cdot + O_2 \quad (1.7)$$

$$ClO\cdot + O\cdot \rightarrow Cl\cdot + O_2 \quad (1.8)$$

$$O_3 + NO\cdot \rightarrow NO_2 + O_2 \quad (1.9)$$

Debido a que los CFCs son compuestos inertes, estos no se degradan al pasar por la troposfera, la cual es la primer capa de la atmósfera que se extiende hasta una altitud aproximada de 16 km. Debido a esto, los CFCs llegan a la estratosfera en donde están expuestos a la acción intensa de los rayos ultravioleta. Con el efecto de la luz ultravioleta los CFCs se degradan de acuerdo a las reacciones anteriores.

En 1985 científicos británicos de la estación de monitoreo atmosférico en la Antártida publicaron un estudio en donde estimaban que la concentración de ozono en la Antártida había disminuido en un 40% de 1977 a 1984[2]. Estudios posteriores realizados en dicha estación demostraron que la región de destrucción de ozono se extendía en un área de 3 millones de kilómetros cuadrados.[3]

Las pérdidas más importantes de ozono estratosférico tienen lugar regularmente cada primavera sobre la Antártida, provocando aumentos substanciales de los niveles de radiaciones ultravioleta en dicha zona. Un efecto similar pero más débil se ha detectado sobre el Artico.

El segundo impacto importante de los CFCs sobre el medio ambiente es su contribución al calentamiento global del planeta. El calentamiento potencial del planeta está relacionado con la capacidad de dicho gas para absorber radiaciones infrarrojas. El potencial de calentamiento global del planeta (PCG) es una estimación del calentamiento atmosférico resultante de la liberación de una unidad de masa de un gas, en relación con el calentamiento que resultaría de la liberación de la misma cantidad de bióxido de carbono. Los CFCs contribuyen de manera importante al calentamiento del planeta, pero hay indicios de que este efecto está globalmente compensado por el enfriamiento que resulta de la destrucción del ozono por los CFCs en la parte inferior de la estratosfera. El calentamiento del planeta, a diferencia del agotamiento de la capa de ozono, no está contemplado por el Protocolo de Montreal, que es el tratado que regula el uso de CFCs.

1.2 EL PROTOCOLO DE MONTREAL

En respuesta al incremento constante en las emisiones de Sustancias Destructoras de Ozono y la generación de mayor evidencia científica sobre los avances y efectos de esta destrucción, 21 estados de la Comunidad Económica Europea se reunieron en marzo de 1985 para discutir esta problemática. Esta reunión histórica conocida como la Convención de Viena para la Protección de la Capa de Ozono, fue el antecedente para un acuerdo internacional para controlar la producción de CFCs. En el convenio, las Partes se comprometieron a proteger la salud humana y el medio ambiente contra los efectos del agotamiento de la capa de ozono, y a colaborar en la investigación, observación e intercambio de información para este fin. En 1987 más de 80 países, 40 de los cuáles eran

países en vías de desarrollo, firmaron el Protocolo de Montreal, en donde los países desarrollados se comprometieron a reducir el uso de CFCs en un 100% para el año 2000, mientras que los países en vías de desarrollo lo harían para el año 2010. A excepción de México que de manera voluntaria se comprometió a disminuir el uso de estos compuestos al ritmo de los países desarrollados.[4]

El Protocolo de Montreal, elaborado en 1987 bajo los auspicios del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, entró en vigor el 1 de enero de 1989. El Protocolo definió las medidas que sus signatarios deberían tomar para limitar la producción y uso de las sustancias controladas, en principio 5 CFCs y halones.

La reciente información científica pronto demostró que el protocolo original no protegería lo suficiente la capa de ozono. Una revisión hecha en Londres en junio de 1990 resultó en la adopción de medidas de control suplementarias, y suministro de asistencia técnica y financiera a los signatarios de los países en vías desarrollo. Las enmiendas de Londres presentaron controles sobre otros 10 CFCs, sobre el tetracloruro de carbono y el metilcloroformo, y establecieron fechas límite para la eliminación de las sustancias controladas. Los requisitos del Protocolo de Montreal revisado en Londres en 1990 se presentan en la Tabla 1.1, en donde se resumen los acuerdos sobre desfasamiento a los que se llegaron en esta reunión.

A cada uno de los compuestos químicos que se controlan se le asigna un Potencial Destructor de Ozono (PDO) en relación con el CFC-11, al cual se le ha dado arbitrariamente un PDO de 1. Estos valores se utilizan para calcular un índice de daño infligido en la capa de ozono por cada uno de los países que produce y utiliza dichas sustancias controladas. La utilización se define como la producción total más las importaciones menos las exportaciones, y excluye, por

tanto, las sustancias recicladas. El efecto relativo sobre el agotamiento de la capa de ozono de la producción de CFCs se calcula multiplicando la producción anual de cada uno de los CFCs controlados por su PDO. Estos totales se suman para obtener un índice del daño potencial sobre el ozono. Los países signatarios se comprometieron a reducir este total en un 50% en 1995, en un 85% en 1997 y en un 100% para el año 2000 (con relación a las cifras de 1986). Los países en desarrollo disponen de un período adicional de 10 años para cumplir estos requisitos.

Tabla 1.1 Resumen de los acuerdos a los que se llegaron con la revisión en Londres del Protocolo de Montreal en 1990

Nombre	Fórmula	PDO	Reducción en la producción y la utilización
CFC-11	$CFCl_3$	1.0	relativo a 1986: 1995 50 % 1997 85 % 2000 100 %
CFC-12	CF_2Cl_2	1.0	
CFC-113	$C_2F_3Cl_3$	0.8	
CFC-114	$C_2F_4Cl_2$	1.0	
CFC-115	C_2F_5Cl	0.6	
Halon 1211	$CBrClF_2$	3.0	similar a la reducción de CFCs
Halon 1301	$CBrF_3$	10.0	
Halon 2402	$C_2Br_2F_4$	6.0	
Tetracloruro de carbono	CCl_4	1.1	relativo a 1989: 1995: 85 % 2000: 100 %
Metilcloroformo	CH_3CCl_3	0.1	relativo a 1989 1993: ningún aumento 1995: 30 % 2000: 70 % 2005: 100 %
HCFC-22	$CHClF_2$	< 1	Sustancias con PDOs bajos, para ser eliminadas en el 2020 si es posible y a más tardar en el 2040
HCFC-123	CF_3CHCl_2	< 1	
HCFC-141	$C_2H_3Cl_2F$	< 1	
HCFC-142	$C_2H_3ClF_2$	< 1	

Nota: Las enmiendas de Londres en 1990 añadieron a la lista de sustancias controladas los siguientes CFCs con un PDO de 1.0:
113, 111, 112, 211, 212, 213, 214, 215, 216 y 217. Los siguientes HCFCs (y sus isómeros): 21, 31, 121, 122, 124, 131, 132, 133, 151, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 231, 232, 233, 234, 235, 241, 242, 243, 244, 251, 252, 253, 261, 262 y 271.
Fuente: Proteger la Capa de Ozono, volumen 4 CAP/IMA Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Centro de Actividades del Programa Industria y Medio Ambiente, París Francia 1992

A raíz de la revisión de Londres y las siguientes reuniones de seguimiento (8 reuniones hasta noviembre de 1996) se creó el Fondo Multilateral, cuya misión es la de proveer los recursos monetarios para la transferencia de tecnología, servicios de consultoría, capacitación y entrenamiento a los países en vías de desarrollo.[4] El fondo se genera por la aportación de los países miembros del Protocolo de Montreal y la agencia que administra los fondos es el Banco Mundial.

A lo largo del ejercicio de esta función el Banco Mundial ha apoyado diversos proyectos en un gran número de países en vías de desarrollo[5]. El total de proyectos financiados asciende a más de mil doscientos y la cantidad de CFCs eliminados bajo el financiamiento del Fondo Multilateral desde su inicio en 1990 hasta el 31 de Mayo de 1996 ascendía a 9842 toneladas[6]. Para facilitar este proceso se asignaron 3 agencias para la implementación del Protocolo de Montreal las cuales son las siguientes [8]:

- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI)

Estas agencias tienen como función primordial el promover la transición a tecnologías sustentables en los países en vías de desarrollo.[7]

El Protocolo de Montreal y el Convenio de Viena son los primeros acuerdos mundiales para proteger a la atmósfera. La cooperación internacional científica ha significado un aspecto destacable del proceso adoptado por las partes en el Convenio de Viena y el Protocolo de Montreal. Las primeras investigaciones cooperativas a gran escala comenzaron en los años 70s, con la preparación bajo los auspicios de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) de un estudio

titulado "Modificación de la capa de ozono debido a actividades humanas y las posibles consecuencias geofísicas".

Desde entonces, más países, instituciones investigadoras y científicos individuales han tomado parte en este esfuerzo investigador mundial, coordinado por un grupo de expertos de la OMM y del PNUMA. Hasta la fecha el grupo ha producido más de 40 informes entre los que figuran 6 importantes trabajos sobre la capa de ozono.

Las Partes en el Protocolo de Montreal han explícitamente reconocido el papel preponderante de la ciencia para proteger la capa de ozono, ya que los conocimientos acerca del agotamiento de la capa de ozono y sus consecuencias estaban incompletos en 1987. También se comprometieron a revisar las medidas de control al menos cada 4 años, presentando informes científicos realizados por una serie de grupos de expertos creados para este fin. Estas revisiones se condujeron con mayor frecuencia, y los informes científicos jugaron un gran papel para persuadir a los legisladores sobre la necesidad de reforzar las condiciones del Protocolo de Montreal en 1990 y de nuevo en 1992.

El último informe del PNUMA, "Evaluación científica del agotamiento del ozono" se publicó a finales de 1994. Fue preparado y revisado por más de 295 científicos de 26 países. Entre sus más importantes hallazgos, que forman la base de la vigente normatividad sobre el agotamiento del ozono, figuran los siguientes:

- La capa de ozono continúa agotándose en la mayoría del globo; los niveles de ozono se disminuyen en un 5% cada decenio en las medias latitudes de ambos hemisferios.

- Los hoyos de 1992 y 1993 en el ozono antártico fueron los más graves registrados hasta la fecha. El ozono casi se había eliminado por completo en algunas zonas.
- Se ha observado un gran incremento de radiación bajo el hoyo sobre el Antártico. Un aumento de UV fue detectado cerca del polo norte en 1992.
- La cantidad de cloro en la atmósfera está aumentando (en un 1.6 % en 1992), aunque más lentamente que antes (2.9 % en 1989). El descenso es el resultado de las medidas tomadas bajo el Protocolo de Montreal.
- Si todos los países cumplieran con el Protocolo de Montreal, la concentración de cloro en la estratosfera alcanzaría un punto máximo hacia el año 2000, para iniciar un lento descenso que duraría una mitad de siglo.
- Es posible que las pérdidas mundiales del ozono, en su punto máximo, lleguen a ser de un 12 % en las latitudes medias. Esto incrementará los niveles de radiaciones UV en la superficie de la tierra en una proporción aún mayor.

En 1995 se marcó el décimo aniversario del Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono, un decenio de esfuerzo mundial para salvaguardar la capa de ozono. La tarea abordada ha sido enorme: acabar con el uso de los CFCs y otras sustancias químicas que están destruyendo el velo vital de ozono que nos protege de los daños de la radiación UV solar.

La preocupación sobre la salud de la capa de ozono no comenzó con el Convenio de Viena. Desde hacía un decenio se sabía que los bromuros y cloruros estables podrían agotar el ozono de la estratosfera. Sin embargo, mientras que algunos científicos estaban preocupados por la hipótesis del agotamiento de ozono, pocos países tomaron la amenaza en serio. Se comenzó un estudio

científico internacional a la vez que se llevaban a cabo las negociaciones que conducían al Convenio de Viena, sin embargo dichas actividades tuvieron lugar en un ambiente de limitada preocupación por parte de gobiernos, industria y público.

El Convenio de Viena, bajo los auspicios del PNUMA, representó un momento decisivo. Creó el primer marco legal mundial para la protección de la capa de ozono, cuando, sólo meses después, el impactante descubrimiento del hoyo en la capa de ozono sobre el Antártico se retransmitió a todo el mundo. Este descubrimiento constituyó la base para una acción posterior. Un ejército de dedicados científicos, economistas, directivos de gobiernos y organizaciones no gubernamentales, entraron en un debate que llevó al Convenio de Viena a un rápido acuerdo en forma de protocolo: el Protocolo de Montreal sobre las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono.

1.3 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA DE LAS ALTERNATIVAS

Debido a la inevitable desaparición de los CFCs, las empresas de la Industria de Espumas de Poliuretano (manufactureras y proveedoras) han desarrollado tecnologías alternativas encaminadas a la sustitución de estos compuestos en el espumado, enfriamiento y limpieza de sus procesos de producción. Sin embargo, las principales alternativas existentes también ofrecen grandes desventajas, entre ellas el alto costo, la flamabilidad de los compuestos químicos, y la afectación de las propiedades fundamentales de las espumas, entre otras. Debido a lo anterior, para la elección del sustituto ideal es necesario identificar entre la amplia gama de tecnologías existentes, aquellas que resulten más apropiadas para cada empresa ya sea a corto o a largo plazo, cuya

implantación no resulte en efectos adversos en términos de competitividad, Impacto Ambiental u otros efectos que vayan en detrimento del bienestar de la empresa o del medio ambiente. Idealmente toda empresa debe llevar a cabo una transición rápida en el uso de SDO, sin embargo, el hacerlo de una manera costo efectiva es la parte fundamental de esta transición. El cumplir con el desfasamiento de CFCs puede llevarse a cabo por medio de una gran variedad de caminos, lo importante es que este se lleve a cabo de una manera sustentable, es decir, que la tecnología adoptada resuelva el problema ambiental y sea la más costo eficiente.

1.4 OBJETIVOS

Objetivo General

- Identificar a las principales alternativas para sustituir a los CFCs de los procesos de producción de Espumas de Poliuretano, clasificar las alternativas de acuerdo a sus principales características, definiendo las principales implicaciones asociadas al uso de cada una de ellas e identificar indicadores para la evaluación y selección de la alternativa ideal, conformando una metodología que sea aplicable y útil a las empresas del sector, considerando las características particulares internas de la empresa y de su entorno.

Objetivos Particulares

Los objetivos particulares se presentan de acuerdo a las siguientes etapas: exploración, diseño, evaluación y resultados.

EXPLORACIÓN

- Identificar los principales subsectores de actividad y procesos que conforman a la Industria de Espumas de Poliuretano.
- Identificar el consumo actual de Sustancias Destructoras de Ozono en la Industria de Espumas de Poliuretano por subsector de actividad.
- Identificar las principales alternativas tecnológicas actualmente utilizadas en la Industria de Espumas de Poliuretano para el desfasamiento de Sustancias Destructoras de Ozono por subsector.

DISEÑO

- Establecer criterios para la clasificación de las alternativas tecnológicas actualmente existentes.

EVALUACIÓN

- Establecer indicadores para evaluar a las alternativas tecnológicas actualmente existentes.
- Establecer el procedimiento de evaluación de las alternativas tecnológicas en estudio.
- Evaluar las alternativas tecnológicas en estudio de acuerdo al procedimiento de evaluación propuesto.

RESULTADOS

- Analizar los resultados de la evaluación identificando las alternativas óptimas que resulten del procedimiento de evaluación establecido.

1.5 ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO

Son cinco etapas las que se desarrollan para el cumplimiento del objetivo central de la presente tesis, estas etapas son las siguientes: exploración, diseño, evaluación, resultados y conclusiones. Se seleccionan estas etapas para apoyar fuertemente el estudio en el método científico.

La etapa exploratoria se desarrolla en los capítulos 1, 2 y 3, en el primer capítulo se identifican los antecedentes del estudio y los objetivos del mismo en base a la situación problemática planteada en la sección 1.3. En el segundo capítulo se identifican los principales subsectores de actividad y procesos que conforman a la Industria de Espumas de Poliuretano, así también se identifica el

consumo actual de Sustancias Destructoras de Ozono de estos subsectores de actividad. En el capítulo 3 se presentan las principales alternativas tecnológicas actualmente utilizadas en la Industria de Espumas de Poliuretano para el desfasamiento de Sustancias Destructoras de Ozono por subsector.

La etapa de diseño de la metodología se desarrolla en el capítulo 4 en donde se establecen los criterios para la clasificación de las alternativas tecnológicas en estudio, los indicadores para evaluar a las alternativas tecnológicas y el procedimiento de evaluación de estas alternativas. En este mismo capítulo se desarrolla la etapa de evaluación de acuerdo al procedimiento de evaluación propuesto, culminando con un análisis del efecto que tienen las ponderaciones asignadas a las dimensiones en estudio (ecológica, desempeño y ambiental) sobre los resultados de la evaluación. La etapa de resultados se presenta al final del capítulo 4, en donde se representa la sensibilidad de los resultados por medio de un diagrama triangular. Posteriormente se presentan las conclusiones del estudio.

El producto final obtenido es una metodología para evaluar alternativas tecnológicas a los CFCs, aplicable a empresas del sector de espumas de poliuretano.

2 DESCRIPCIÓN DEL SECTOR DE LA INDUSTRIA DEL POLIURETANO

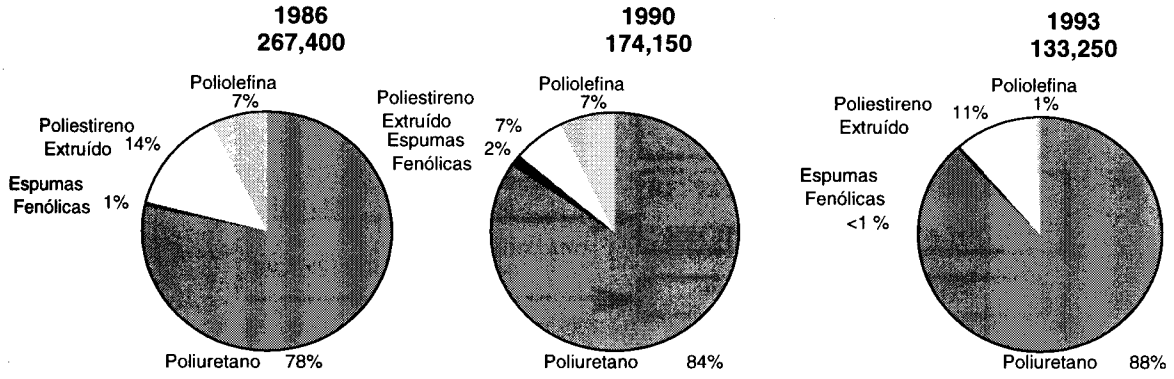
La Industria de Espumas de Poliuretano (IEP) está conformada por una gran variedad de productos y procesos. En este capítulo se dará una descripción de los principales ramos que conforman esta industria y se discutirán los procesos involucrados.

2.1 IMPORTANCIA DE LA INDUSTRIA DE POLIURETANO A NIVEL MUNDIAL

La importancia de la IEP en el sector productivo de la industria manufacturera a nivel mundial es considerable, sus aplicaciones abarcan diferentes sectores productivos, entre los cuales se encuentran aquellos dirigidos a la preservación de alimentos, el aislamiento térmico de construcciones y la conformación de dispositivos de seguridad en automóviles (particularmente en la elaboración de bolsas de aire). Estas aplicaciones tienen la finalidad de cubrir necesidades básicas de la sociedad, por lo que una serie de implicaciones sociales se ligan a la problemática del desfasamiento de CFCs en este sector.

El consumo de CFCs en el sector de espumas durante 1986, año previo a la firma del Protocolo de Montreal fue del orden de las 270 mil toneladas, de las cuales el 78 % correspondía al sector de las espumas de poliuretano, el 14 % lo representaba el poliestireno extruido, el 7% las poliolefinas y el 1% restante las espumas fenólicas. El uso de los CFCs a partir de la firma del Protocolo de Montreal se redujo a 133 mil toneladas para 1993, es decir, una reducción del

50% en un período de 7 años. [7]. En la Figura 2.1 se aprecia que las espumas de poliuretano tienen el mayor consumo de CFCs en la Industria de las Espumas Plásticas, por lo tanto representan el sector de mayor prioridad para el desfasamiento.



UNEP, 1994 Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee

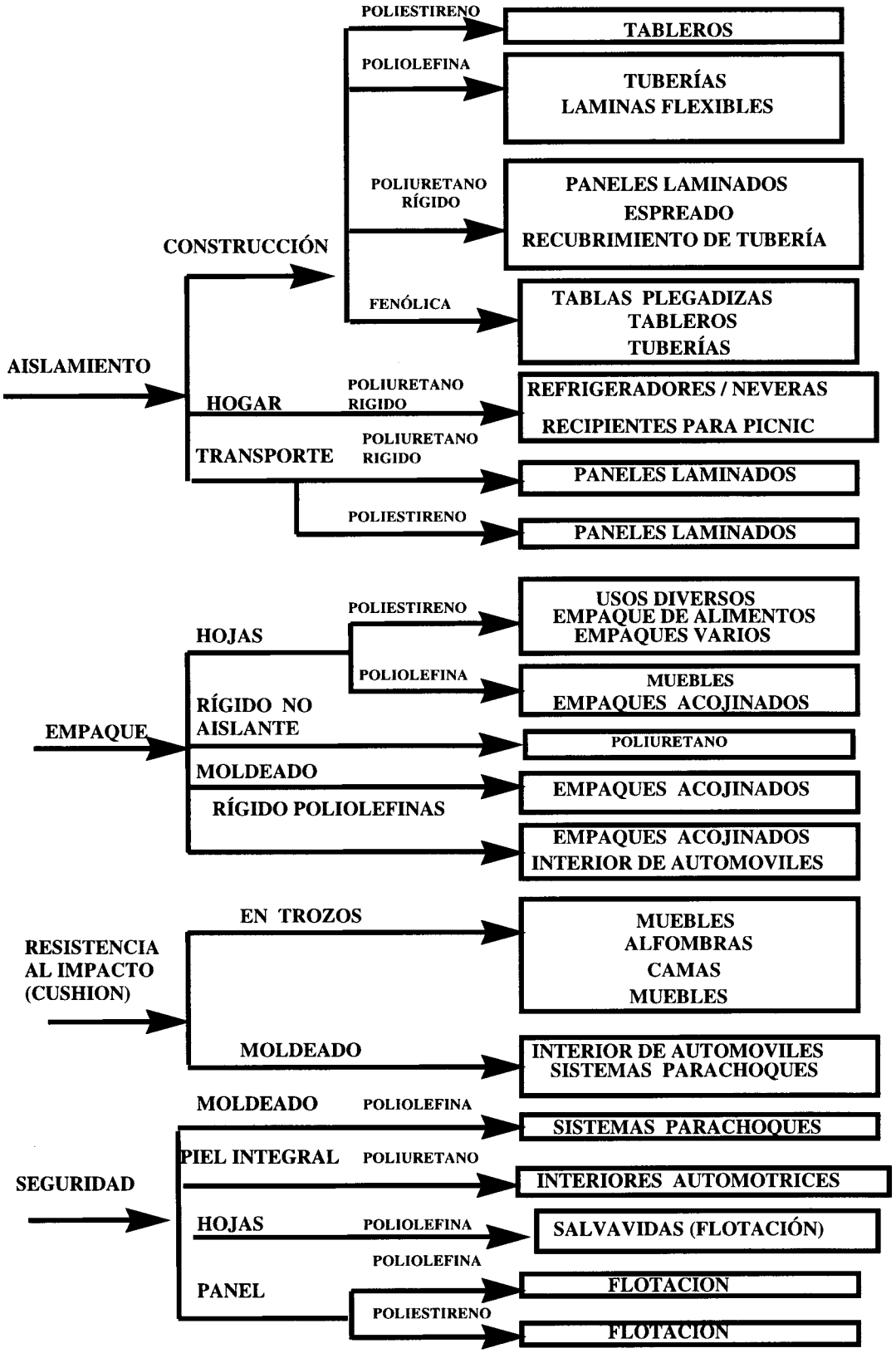
Figura 2.1 Consumo de CFCs en el Sector de Espumas (toneladas/año)

Las espumas de poliuretano pueden ser clasificadas en base a sus aplicaciones, características fisicoquímicas, procesos de manufactura y composición. En la Tabla 2.1 se presentan las principales aplicaciones de las espumas de poliuretano, en ella se identifican las principales funciones de las espumas entre ellas: aislamiento, empaque, resistencia al impacto y seguridad.

En la clasificación por características fisicoquímicas se distinguen dos tipos básicos de espumas de poliuretano: la espuma estructural, la cual puede ser clasificada como flexible o rígida y el tipo RASE (Recubrimientos, Adhesivos, Selladores y Elastómeros). Entre las principales características de cada tipo se enumeran las siguientes:

- La espuma estructural típica requiere la adición de ciertos surfactantes para mejorar la calidad de la superficie, un polieter o poliester, una amina o un

Tabla 2.1: Principales Aplicaciones de las Espumas Plásticas



catalizador, retardantes de flama, agentes espumantes y un isocianato polimérico.

- Un sistema RASE típico contiene por lo general un poliol polieter de cadena larga, un extendedor de cadena como el etilenglicol, butanodiol, una amina o catalizador y un isocianato modificado como el difenilmetanodiisocianato (MDI).

La clasificación por procesos es la que se tomará como referencia para el desarrollo del presente estudio. En esta clasificación se distinguen tres grupos: las espumas flexibles, rígidas y misceláneas. Las espumas rígidas representan el grupo de mayor consumo de Sustancias Destructoras de Ozono (CFCs y HCFCs) con el 99% del consumo de HCFC y el 92 % del consumo de CFC a nivel mundial. La Figura 2.2 muestra la clasificación de las diferentes aplicaciones de acuerdo a los procesos de producción involucrados, el sector de la construcción conformado por la elaboración de paneles laminados y tipo sandwich consume el 40% y el 65% del consumo de CFC y HCFC respectivamente en la Industria de Espumas de Poliuretano.

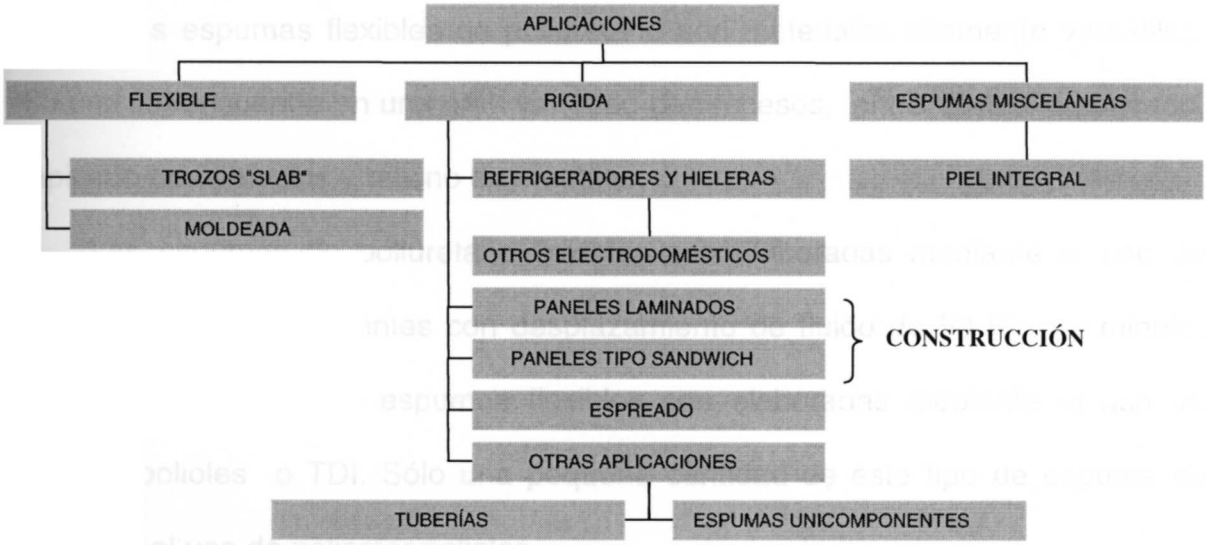


Figura 2.2 Principales aplicaciones a analizar en este estudio

2.2 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE POLIURETANO

En esta sección se presentarán los principales procesos de producción de espumas de poliuretano. En primera instancia se presentan los procesos de producción de espumas flexibles, los cuales se presentan en dos modalidades: espumas elaboradas en trozos y espumas elaboradas en moldes. Los proceso de elaboración en moldes se clasifican a su vez en procesos continuos y discontinuos, los cuales también se discuten en esta sección. Para las espumas rígidas se analizan las aplicaciones para: refrigeradores y hieleras, otros electrodomésticos, paneles para la construcción, espreado y otras aplicaciones. La Figura 2.2 representa esquemáticamente a las aplicaciones que se tratarán en esta sección, excluyendo a las espumas misceláneas ya que el estudio se centra en las aplicaciones para espumas flexibles y rígidas.

2.2.1 Espumas De Poliuretano Flexible

Las espumas flexibles de poliuretano son materiales altamente versátiles. Su uso se encuentra en una gran variedad de procesos, entre ellos el empacado, tapizado de vehículos y relleno de muebles.

Las espumas de poliuretano flexibles son elaboradas mediante el uso de máquinas multicomponentes con desplazamiento de fluido de 50 Kg por minuto. La mayor parte de las espumas flexibles son elaboradas mediante el uso de polieter polioles o TDI. Sólo una pequeña cantidad de este tipo de espuma se basa en el uso de poliester polioles.

Los procesos de producción de espumas flexibles se clasifican en espumas en trozos y moldeados, a continuación se hace una descripción de cada uno de ellos.

ESPUMAS EN TROZOS

Las espumas flexibles en trozos incluyen a las espumas base de polieter y poliester utilizadas para la elaboración de productos acojinados de varias densidades y firmezas, en cada una de las categorías genéricas: convencional, alta resistencia y alta resistencia con combustión modificada.

Las espumas en trozo son ampliamente utilizadas en la elaboración de muebles, camas, interior de tapicería e interiores automotrices (ya sea como acojinamiento o para reducir el ruido). Muchas espumas especiales de este género son utilizadas en aplicaciones técnicas como filtros, células de combustible y empacado antiestático. Estas espumas son producidas en grandes bloques los cuales son cortados para usarse como aplicaciones individuales.

En aplicaciones donde se requiera cumplir ciertos estándares de flamabilidad, se elaboran espumas modificadas combustibles, las cuáles contienen melanina, grafito, ésteres fosfóricos clorinados o trihidrato de alúmina para mejorar el desempeño de flamabilidad de la espuma. También se utilizan mayores cantidades de agentes espumantes para contrarrestar el incremento de dureza y densidad resultante de la introducción de estos aditivos sólidos.

Las espumas combustibles modificadas son principalmente utilizadas en la elaboración de muebles y en colchones. En algunos países, son utilizadas principalmente en prisiones, instituciones, lugares de alto tráfico transeúnte, mientras que en otros países como el Reino Unido, su uso es dirigido

principalmente a todas las aplicaciones domésticas. La mayoría de las alternativas tecnológicas disponibles para espumas flexibles pueden ser utilizadas indistintamente en espumas combustibles modificadas.

La Figura 2.3 muestra las principales operaciones involucradas en este proceso. En la primera etapa se lleva a cabo la inyección de la materia prima (poliol isocianato y agente espumante), aditivos retardantes de flama tales como el dicloropropil fosfato son incorporados en cantidades necesarias para satisfacer los requerimientos. Las condiciones de operación por lo general oscilan alrededor de los 30°C y presión atmosférica. En la siguiente etapa se pasa la espuma a través de un túnel en donde se permite que transcurra el tiempo necesario para que la reacción termine, a esta etapa se le conoce como curado. Por último, una vez que la espuma ya ha sido formada se procede al corte de la misma, de esta forma se concluye el proceso de producción.

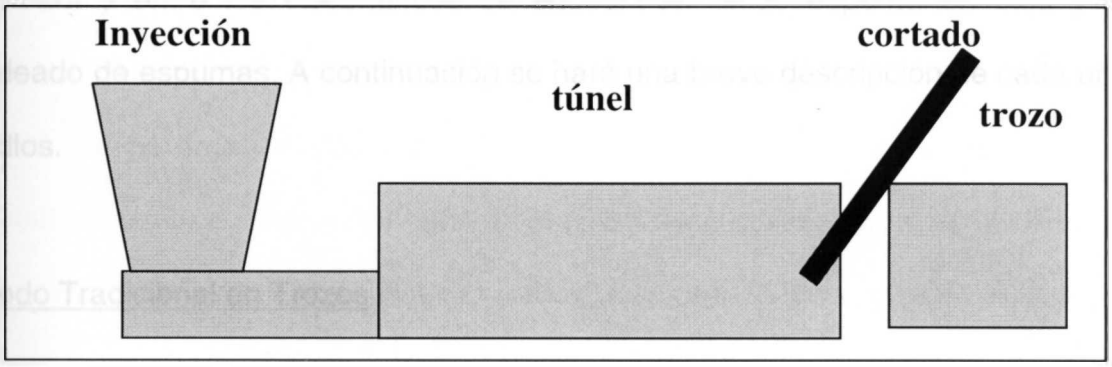


Figura 2.3 Proceso de producción de espuma en trozos

ESPUMAS MOLDEADAS

El uso mas significativo de las espumas moldeadas de poliuretano se lleva a cabo en el sector automotriz, básicamente en la elaboración de descansacodos y respaldos de asientos. Las espumas moldeadas flexibles son utilizadas en la elaboración de asientos para autobuses, trenes, aviones y otros medios de transporte. Un mercado particular es el de la eliminación de ruido en automóviles. Estos usos en conjunción representan por lo menos el 90% de las espumas flexibles moldeadas a nivel mundial. El 10% restante de las espumas moldeadas es utilizado en aplicaciones no automotrices.

Los procesos involucrados en la elaboración de espumas flexibles moldeadas se clasifican en: continuos y discontinuos. Entre los principales procesos continuos se encuentran los siguientes: Método tradicional en trozos, Maxfoam/Varimax, Vertifoam y entre los discontinuos se encuentran el de espuma en caja y el moldeado de espumas. A continuación se hará una breve descripción de cada uno de ellos.

Método Tradicional en Trozos

En una línea tradicional, la espuma en trozos se produce a través de una banda transportadora llamada túnel espuma que puede ser de hasta 60 metros de longitud. Los productos químicos líquidos se introducen en una cabeza mezcladora. La formula alimentada varía para diferentes grados y entre diferentes aplicaciones. En la Figura 2.4 se presenta un esquema del proceso.

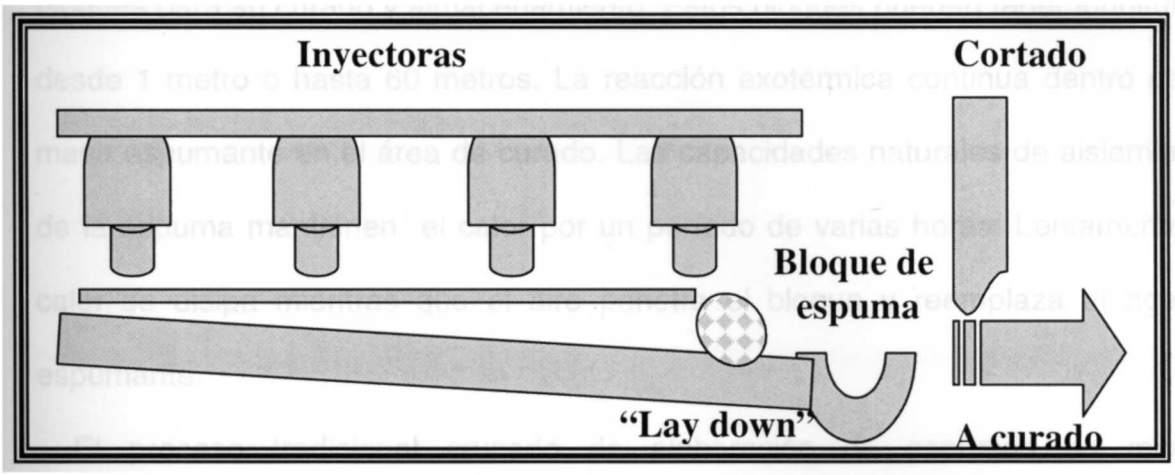


Figura 2.4 Proceso de producción continuo de espuma flexible moldeada

El flujo de entrada a la cabeza mezcladora se suministra a través de un aspersor con un patrón transversal a lo largo de lo ancho de la banda transportadora, con una cierta inclinación, a esta etapa se le conoce como "lay down". La banda transportadora se alinea con papel o laminas delgadas de polietileno para formar un contenedor de la espuma que tiene forma de "u" y que se utiliza para contener a la espuma a medida que desciende de la curva. A medida que la reacción de polimerización continua y las células se forman, la espuma aumenta y los agentes espumantes se volatilizan debido a la generación interna de calor. A 3 metros del "lay down" la masa de espuma por lo general alcanza su punto de mayor expansión. La espuma puede tener una altura de 1 o 1.25 metros y un grosor de 2 a 2.5 metros. De su punto de máxima expansión, la espuma empieza a desprender sus agentes espumantes y algunos productos químicos no reaccionados. Un túnel ventilado, se utiliza en la primera sección de la banda transportadora, sirve como ahogador de estas emisiones y controla las concentraciones en el microambiente. Los trozos continuos de espuma se mueven a través del túnel de producción hacia una máquina que corta la espuma en

bloques para su curado y almacenamiento. Estos bloques pueden tener longitudes desde 1 metro o hasta 60 metros. La reacción exotérmica continua dentro de la masa espumante en el área de curado. Las capacidades naturales de aislamiento de la espuma mantienen el calor por un período de varias horas. Lentamente el calor se disipa mientras que el aire penetra el bloque y reemplaza al agente espumante.

El proceso tradicional cruzado de elaboración de espumas es menos económico que los métodos mas recientes, en consecuencia el uso de este proceso esta en decremento. Adicionalmente, el proceso es por lo general mas complejo y la introducción de agentes espumantes alternativos a los CFCs es mas problemático. Sin embargo, este proceso sigue siendo la opción principal para espumas de poliester y muchos otros productos especiales en donde el tamaño y la uniformidad de la célula son críticos.

Maxfoam/Varimax

Desarrollado a principios de los años 70s el proceso Maxfoam/Varimax difiere del método tradicional en el "lay down" y la expansión de la espuma, la Figura 2.5 muestra un esquema del proceso. Los productos de la cabeza mezcladora son descargados directamente en la parte baja de una canaleta la cual se encuentra a la altura máxima deseable de la espuma a formar.

La espuma en expansión se vierte por la canaleta y es descargada por medio de una serie de platos curvos que recogen la espuma para dirigirla a la banda transportadora. La curva de los platos es similar en forma al patrón ascendente de

la espuma, por lo que esto permite la expansión hacia abajo, teniendo como resultado la formación de espuma de forma rectangular.

Actualmente el proceso de Maxfoam/Varimax de mayor aceptación es menos complicado y más eficiente que los procesos convencionales (mayor altura de la espuma, mayor control de densidad y firmeza).

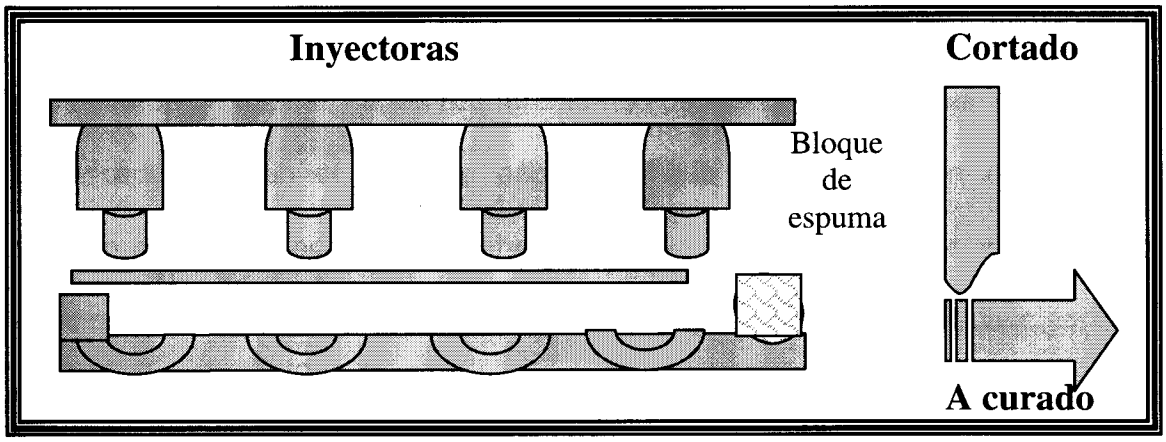


Figura 2.5 Proceso de producción Maxfoam/Varimax

Vertifoam

El proceso de Vertifoam produce la espuma de manera vertical. Como resultado se obtienen bloques a menor velocidad. Sin embargo esta velocidad menor permite tener un mejor control en las propiedades de la espuma. Este método es muy apropiado para pequeños productores, ya que permite una operación eficiente a escalas de producción de 500 a 3 000 toneladas anuales.

Los bloques de espuma son producidos con gran precisión y pérdidas mínimas. Las paredes superficiales de los bloques formados con la tecnología Vertifoam son más delgadas que los anteriores y menos densas, además no se forman rebabas pesadas en los bordes de la espuma. Las paredes delgadas permiten la rápida

difusión durante el enfriamiento o recuperación de la espuma. Con esta tecnología se pueden producir bloques redondos y cuadrados.

El proceso Vertifoam difiere substancialmente de las máquinas tradicionales que operan con un flujo horizontal, las cuales operan a altas velocidades de dosificación, y son utilizadas para producir bloques de espuma grandes. Las altas velocidades de dosificado de las máquinas convencionales de espumado generan altos costos de capital y altos requerimientos de calefacción y ventilación.

La reducción en el área de espumado que se obtiene con el proceso de Vertifoam es superior al 85 %. El hecho de que la distancia entre el vertedero de espuma y la superficie sea corta se traduce en una gran reducción en los requerimientos del sistema de extracción, lo cual significa que los costos de ventilación y calentamiento se ven reducidos.

En países en donde la legislación obliga la recuperación o reciclado del agente espumante, la velocidad más lenta de extracción favorece los costos de capital y de operación en el reciclado y equipo de absorción.

Los principales procesos discontinuos son: espuma en caja y moldeado de espumas, a continuación se hará una breve descripción de cada uno de ellos.

Espuma En Caja

En muchos países en vías de desarrollo en donde el recurso humano es abundante dos componentes en forma liquida en lote se mezclan y literalmente pueden ser vertidos en una caja en línea la cual posteriormente se expande y cura en un bloque final.

Moldeado De Espuma

En el proceso de moldeado para la elaboración de espumas flexibles, los productos químicos son vertidos a un molde de un tamaño y forma preestablecida. Posteriormente a la limpieza del molde y la aplicación de desmoldante se llenan los moldes, y luego son cerrados. A medida que la reacción ocurre dentro del molde, el polímero se forma y simultáneamente se expande para llenar la cavidad del molde. Muchos productos moldeados son flexionados de manera manual o presionados por baleros cuando son removidos del molde para abrir las células faltantes. En algunos casos la nueva parte desmoldada es calentada previa a su curado para endurecer su superficie.

Generalmente, en el sector automotriz la espuma moldeada flexible puede ser producida ya sea por curado en caliente (aproximadamente una tercera parte de la producción) o curado en frío (aproximadamente 2 terceras partes de la producción) esto de manera global. El curado en caliente se utiliza exclusivamente en la industria automotriz para la elaboración de asiento y descansa codos. El curado en frío se utiliza en el sector automotriz (asientos, descansa codos, forrado interno y descansa cabeza) y en aplicaciones no automotrices (muebles).

El CFC-11 se ha utilizado típicamente en grados super ligeros (para el acojinamiento de sillones) y en grados de alta densidad (25 Kg/m3). En 1986 aproximadamente 10% de toda la producción de espumas utilizó CFC-11 en su manufactura. En fórmulas que utilizan espumas de alta resistencia, los agentes espumantes son desfasados.

2.2.2 Espumas de Poliuretano Rígido

La mayor parte del poliuretano premanufacturado rígido es producido en líneas laminadoras en donde diversos ingredientes son adicionados dependiendo del uso final. Las características más importantes de la espuma son la densidad, uniformidad y fuerza de compresión. Estas son afectadas al variar las cantidades y no necesariamente el tipo de materia prima.

A continuación se mostrará el panorama de la producción y procesos para la elaboración de espumas rígidas en las categorías de: refrigeradores y hieleras, otros electrodomésticos, construcción (paneles) y otras aplicaciones.

REFRIGERADORES Y HIELERAS

Las espumas de poliuretano rígidas continúan siendo los materiales aislantes dominantes utilizados en la elaboración de refrigeradores y hieleras. En estos productos la espuma representa un elemento crucial en la estructura interna de los mismos, lo que les permite proporcionar un aislamiento muy eficiente. La espuma debe tener la suficiente fuerza para soportar la compresión, y flexibilidad para asegurar la integridad del producto bajo condiciones de temperatura extremas durante su transporte y uso. Debe ser capaz de mantener su efectividad aislante y sus propiedades estructurales a través del ciclo de vida. El uso de CFCs ha resultado efectivo para poder reunir todas las características antes mencionadas.

A medida que se desarrollan productos sustitutos es necesario que estos posean las características requeridas para mantener el desempeño global del producto a lo largo de su ciclo total de vida.

Aunque los requerimientos básicos para el aislamiento de refrigeradores y hieleras son similares en la mayoría de los procesos manufactureros, las instalaciones de la planta de manufactura, las condiciones particulares del mercado local y los requerimientos legales resultan en una situación en donde requerimientos específicos existen para mercados específicos. Un ejemplo lo representa la importancia del consumo de energía en los mercados de Japón y Estados unidos, lo cual ha influenciado a los productores a usar fórmulas con mayores niveles de CFC para lograr conductividades bajas requeridas en los mercados del Este de Europa.

La inyección de productos químicos en fase líquida se lleva a cabo entre la capa externa e interna del producto en donde se lleva a cabo la reacción. Posteriormente el material fluye y se expande para formar una espuma de poliuretano rígida a través de la cavidad de la cabina. Estructuras adicionales se proveen para soportar las paredes las cuales se encuentran bajo presión por la espuma. Típicamente, un pequeño porcentaje del agente espumante escapa de la mezcla y es venteado durante el proceso de espumado. Los procesos por lo general no son capaces de recuperar este agente perdido, así que generalmente es emitido directamente a la atmósfera.

A lo largo del tiempo transcurrido desde la firma del Protocolo de Montreal, los proveedores de espumas han desarrollado fórmulas reduciendo el uso de CFCs las cuales tienen propiedades (viscosidad, velocidad de reacción, exotérmicas, etc.) que reúnen las necesidades de los procesos de producción, sin embargo la principal problemática es lograr mantener con estos productos sustitutos la calidad del producto final y los costos de producción.

OTROS ELECTRODOMÉSTICOS

Esta categoría incluye todas las aplicaciones de electrodomésticos excluyendo refrigeradores domésticos y hieleras. Las principales aplicaciones son:

- Calentadores de agua - En donde el aislamiento de la espuma proporciona un ahorro significativo en el consumo de energía, particularmente en diseños en donde el espacio para el aislamiento es limitado.
- Refrigeradores comerciales y hieleras - Los cuales son por lo general más grandes que las unidades domésticas.
- Enfriadores de agua - Los cuales deben tener una alta capacidad aislante y estructura ligera.

Las aplicaciones antes enlistadas son producidas por adición directa o inyección de los productos químicos de la espuma entre la superficie interna y externa del artículo. La mayoría se sujetan en moldes durante el proceso de espumado. Los contenedores refrigerados también son producidos mediante el espumado por secciones dentro de una línea de ensamble.

Muchas empresas manufactureras de estos productos en Europa y Norteamérica desfasaron el uso de CFC-11 durante 1993. En países en vías de desarrollo, varios productores están desarrollando planes de desfasamiento.

CONSTRUCCIÓN

Las espumas de poliuretano (PU) y polisocianato (PI) pueden ser continuamente laminadas con varios materiales superficiales tales como el aluminio, papel, vidrio y plástico. Estos productos son utilizados principalmente

como aislantes en edificios, aislantes en tanques y colectores solares. En edificios, su mayor uso es en el aislamiento de techos de comercios, otros usos incluyen el aislamiento de paredes, cavidades, etc.

Las espumas laminadas rígidas de PU y PI han penetrado los mercados de aislamiento de edificios debido a que estos productos ofrecen las siguientes características:

- Baja conductividad térmica - Valores altos de eficiencia energética pueden lograrse usando capas delgadas de espuma. Espumas laminadas con exterior impermeable ofrecen los valores más altos de aislamiento. La conductividad térmica baja se origina de la estructura polimérica fina de las células cerradas en combinación con el CFC-11 como principal agente aislante. La retención de la baja conductividad térmica es una característica importante cuando se consideren sustancias alternativas.
- Desempeño ante el fuego - El PI y las espumas de PU retardado ofrecen excelentes resultados ante las pruebas de fuego bajo una gran variedad de procedimientos de pruebas.
- Fuerza de compresión - Esta propiedad es muy importante en aplicaciones en techos, debido al tráfico de mantenimiento y construcción que un sistema de techado debe contener.
- Facilidad de procesado - Una ventaja del producto es su facilidad de manufactura combinado con su excelente adherencia a una gran diversidad de materiales.
- Facilidad de uso y manejo - Los productos laminados son de bajo peso, y se ofrecen en una gran variedad de grosores, proporcionan una rigidez estructural

excepcional y en el caso de PI cuando es utilizado en techos, puede sellar en caliente y ser utilizado sin tecnología de separación.

Existen dos tipos principales de máquinas de laminado continuo:

- El laminador continuo horizontal usado para la elaboración de productos con dos superficies, por ejemplo aluminio y papel, también una superficie rígida y una flexible.
- El laminador inverso se utiliza para producir una superficie rígida en forma laminar. Los componentes químicos son medidos y mezclados desde la cabeza mezcladora hacia el transportador de presión en donde el calor externo puede ser aplicado para promover un curado más rápido antes de que la espuma sea transportada a la región de cortado. Este producto también puede ser elaborado usando métodos de producción en bloques.

Los principales dos centros de manufactura son Europa y Norteamérica. En Europa la mayor parte de la espuma de poliuretano es utilizada con la adición de retardante de fuego para obtener las características de flamabilidad requeridas y el término de laminación flexible es comúnmente utilizado para describir este proceso, por otro lado en Norteamérica el llamado "boardstock" es un producto de PI y no se utilizan retardantes para el fuego. Existe muy poca producción con esta técnica en los países en vías de desarrollo.

Paneles

Los paneles utilizados para la construcción se clasifican en dos tipos: tipo sandwich y laminado. Difieren únicamente en la forma en que es adicionado el agente espumante, ambos contienen núcleos de espuma entre las superficies

rígidas. Las superficies estan diseñadas para aumentar la rigidez. Los materiales superficiales son generalmente acero, aluminio o fibra de vidrio o fibra de vidrio con una lámina plástica de refuerzo. Los paneles son utilizados en la industria de la construcción en aplicaciones tales como:

- Almacenamiento en frío - para almacenar comida congelada o fresca
- Puertas
- Tiendas al menudeo
- Empresas - particularmente cuando se requieren medidas de higiene particulares como es el caso de las industrias de las ramas de la electrónica, farmacéuticas y procesadoras de alimentos.

Los paneles también son utilizados en la industria del transporte para la manufactura de camiones aislados En todas las aplicaciones, la propiedad aislante de la espuma es requerida en conjunción con su fuerza y capacidad autoadherible. Los paneles son componentes con una construcción de alta calidad molecular y su uso está creciendo rápidamente a nivel global.

El grosor del panel, dependiendo de la aplicación, varía de 30 a 200 mm y productos en todo este rango pueden ser elaborados ya sea por procesos continuos o discontinuos, en donde:

- El proceso continuo utiliza un laminador horizontal similar al utilizado en la elaboración de paneles laminados flexibles. Sin embargo, equipo adicional se instala para convertir láminas de acero doblado a perfiles superficiales que se alimentan en el laminador.

- En el proceso discontinuo, superficies perfiladas o planas pasan a ensamblado, con separadores adecuados en prensas. La espuma se inyecta en puertos múltiples o se utiliza una descarga única.

Las aplicaciones de paneles laminados y tipo sandwich representan el principal consumo de CFCs en la actualidad. A continuación se presenta la aplicación de espreado.

Espreado

Las espumas espreadas son utilizadas para aplicaciones in situ en el aislamiento térmico rígido. Su principal uso es en aplicaciones en techos, especialmente en Norteamérica. A nivel mundial, las espumas espreadas son utilizadas en edificios comerciales y residenciales, tanques de almacenamiento industriales, tuberías, ductos y transporte refrigerado en tanques y camiones. La espuma espreada es aplicada por contratistas de acuerdo a las instrucciones de los productores de los sistemas.

La espuma espreada es aplicada usando una pistola manual presurizada, en donde se introducen bajo presión y de manera separada el poliol y el isocianato en forma líquida, a través de ella se mezclan y son expulsados los materiales ya mezclados.

Diferentes parámetros de proceso y fórmulas imparten diferentes propiedades a la espuma, entre ellas el incremento en la fuerza de compresión y la estabilidad adecuada con el calor y humedad. La habilidad del formulador para ajustar las propiedades de la espuma es importante, considerando que la espuma es aplicada en una gran variedad de condiciones climáticas.

La espuma es espreada directamente de la cabeza mezcladora hacia el sustrato. El método de aplicación favorece la cobertura de grandes superficies. Para aplicaciones en donde se requiere de un alto grosor de espuma, se aplican capas múltiples de espuma de no mas de 10mm de espesor. La espuma espreada necesita ser altamente reactiva para que se adhiera a superficies verticales durante la aplicación. Las tuberías pueden ser aisladas con espuma espreada utilizando una pistola fija y rotando de manera transversal y horizontal la tubería.

OTRAS APLICACIONES DE ESPUMAS DE POLIURETANO RÍGIDO

Otras aplicaciones de las espumas de poliuretano rígido incluyen: paneles continuos laminados, tuberías concéntricas y espumas unicomponentes. En este sector el consumo global no pudo ser separado por cada aplicación así que se presenta de manera global en párrafos posteriores.

Paneles Laminados Continuos

Los paneles rígidos de poliuretano son utilizados como aislantes para tuberías y tanques de almacenamiento, como capas de aislamiento en la construcción y aislante para el transporte refrigerado de contenedores. Los paneles rígidos pueden ser fabricados en una gran variedad de formas y figuras.

Los paneles rígidos son producidos usando procesos continuos y discontinuos. Tradicionalmente el CFC-11 ha sido utilizado en ambos procesos como agente espumante, aunque en ocasiones el agua y/o CFC-12 son introducidos en la

mezcla. Durante 1993, la conversión parcial a agentes espumantes alternativos se llevo a cabo.

En el proceso continuo, la mezcla reaccionante es inyectada de manera continua hacia un abrevadero alineado con papel o una capa de polietileno y localizado en una banda transportadora. La espuma se expande mientras se desplaza en la banda transportadora.

En el proceso de producción independientemente del método utilizado, la espuma se forma debido a la expansión del agente espumante y su posterior curado. Posteriormente se corta en secciones para su uso en las aplicaciones y productos enlistados con anterioridad. En general, los paneles rígidos que se elaboran con estos procesos no requieren una superficie especial ni tampoco un recubrimiento impermeable.

Paneles Laminados Discontinuos

En el método discontinuo, los componente químicos de un sistema de reacción lenta son pesados y mezclados ya sea a mano o con un agitador mecánico, posteriormente estos son vertidos en un molde. Un seguro flotante ajustado en el extremo de la espuma, se eleva con la expansión de la misma. El seguro sirve para mantener el nivel deseado del bloque de espuma que se está produciendo. El producto del método discontinuo puede ser incrementado mediante la utilización de mezcladores mecánicos y agitadores para reemplazar la etapa de mezclado manual, o por máquinas que hacen ambas cosas, mezclar y dispensar la espuma de la mezcla de reacción hacia el molde.

A continuación se presentan las dos principales aplicaciones de los procesos discontinuos: tubo preformado y espuma unicomponente.

Tubo Preformado: Las secciones tubo en tubo de aislamiento típicamente contienen un tubo interior de acero cubierto con una espuma aislante, que a su vez es protegida por una tela plástica. Estas tuberías son instaladas en terrenos subterráneos y son utilizadas para transportar agua caliente de un boiler central a unidades periféricas. Tuberías similares y otras son aisladas con secciones de tubería preformadas usadas en unidades de producción y plantas químicas para el transporte de fluidos calientes o fríos. Las tuberías de gran diámetro aisladas contienen recubrimientos posteriores de elastómeros o bitumen para proporcionar una barrera de agua permanente.

Las secciones de tubo en tubo son producidos mediante la inyección de los químicos de la espuma en la cavidad entre las dos tuberías. Las tuberías preformadas se producen mediante la adición o inyección de los productos químicos de la espuma en moldes de secciones transversales.

Los procesos continuos han estado siendo introducidos mediante la inyección de la espuma en la tubería interna, curada y recubierta a su vez por un plástico externo, el cual es posteriormente extraído a través de un dado anular.

Espuma Unicomponente: Espumas de un solo componente son utilizadas por la industria de la construcción y el mercado de los paquetes de hágalo Ud. mismo en una gran variedad de aplicaciones. Estas incluyen el aislamiento de tuberías, cables, puertas, ventanas, el sellado de puertas y ventanas, el pegado de paneles de aislamiento, tablas de techado, entre otras. Las espumas unicomponentes son preferidas debido a que son portátiles y fáciles de aplicar y ofrecen propiedades térmicas y aislantes adecuadas.

Las espumas unicomponentes son compuestos prepolimeros con base MDI, que históricamente contenían CFC-12, el cual tiene un punto de ebullición más bajo que el CFC-11. Este compuesto ha sido utilizado debido a que actúa como un propelente y porque previene que el material fluya fuera del área de aplicación. Adicionalmente, espumas de este tipo no generan el suficiente calor para volatilizar el CFC-11.

Las espumas unicomponentes son distribuidas en cilindros presurizados y latas de aerosol pueden ser inyectadas y ajustadas con un aspersor a través del cual se extruye una pequeña filmina de material. Después de la aplicación, la espuma se expande a temperatura ambiente y cura al reaccionar con la humedad del aire. Esta característica es única de las espumas unicomponentes. La espuma continua su curado internamente después de secarse debido a la difusión de la humedad del aire dentro de la misma. El tiempo total necesario para el curado de la espuma depende de la temperatura y la humedad relativa.

2.3 CONSUMO DE POLIURETANO A NIVEL MUNDIAL

De acuerdo a la encuesta realizada por la Sociedad de Industrias plásticas de los Estados Unidos en 1994, se estimó que el consumo de poliuretano durante el año de 1993, ascendió a aproximadamente 9 billones de toneladas a nivel mundial.[18]

A nivel regional, la demanda de espuma de poliuretano es relativamente cercana a la producción, debido a que el comercio es relativamente pequeño. Aun en los Estados Unidos el suministro sigue geográficamente la demanda, particularmente para productos flexibles. Los mercados y las tecnologías de

espumas rígidas y flexibles son diferentes, la mayor parte de los productores se concentran ya sea en una o la otra, pero rara vez en ambas. Sin embargo el consumo de espumas flexibles ha sido históricamente mayor al de las rígidas.

A continuación se discute la tendencia en el consumo de CFCs y HCFCs en espumas flexibles y rígidas.

2.3.1 Consumo Global de Espumas Flexibles

Aproximadamente 46,750 toneladas de CFC-11 fueron utilizadas a nivel mundial en 1986 en la producción de bloques de espuma flexible. En aquel entonces esta cifra representaba el 17-18 % de todo el CFC utilizado en la producción de productos plásticos. El uso del CFC-11 en la producción de espumas flexibles ha declinado sustancialmente a nivel mundial desde 1986. El consumo estimado de CFCs para bloques de espuma de poliuretano flexible ha declinado de 12,450 toneladas en 1990 a 9,250 toneladas en 1993.

La eliminación completa de CFCs en las espumas flexibles ha sido logrado en Norteamérica y en Europa. Esto se ha logrado debido a que ha existido una gran opresión de parte del mercado consumidor en el sector de espuma flexible, y los clientes piden productos que contengan la leyenda "libre de CFC".

En 1986 aproximadamente 13,700 toneladas de CFC-11 fueron utilizadas en la producción de espumas moldeadas flexibles a nivel mundial. En 1990 , se estimo que 1,500 toneladas de CFC fueron utilizadas. En 1993, el consumo ha declinado a aproximadamente 550 toneladas (principalmente en Egipto, India, Indonesia, Malasia, China, filipinas y Argentina).Ha existido una tendencia hacia la disminución del uso de CFC-11 en aplicaciones de espumas moldeadas a medida

que las empresas automotrices han aumentado sus densidades en las espumas para asientos. En las espumas moldeadas, sin embargo, los CFCs son utilizados no solo para la reducción de densidad, sino como facilitadores de la fluidez del sistema espumante en los moldes.

Los sectores de espumas flexibles y piel integral consumen una cantidad considerablemente menor al de otras aplicaciones del sector (espumas rígidas) [7], esto se puede apreciar en las Tablas 2.2 y 2.3

Tabla 2.2: Consumo de CFC en la elaboración de espumas flexibles de poliuretano de 1986 a 1993 (toneladas)

Región	1986	1990	1993
Lámina flexible Norteamérica	11 150	1 350	25
Europa Occidental	10 800	5 900	3 000
Este de Europa	4 400	800	1 600
Medio oriente y Africa	6 200	1 200	225
Centro y Sudamérica	5 300	1 000	500
Japón	2 000	900	100
Región Asia Pacifico	6 900	1 300	3 250
Total lámina flexible	46 750	12 450	8 700
Total moldeado	13 700	1 500	550
Total	60 450	13 950	9 250

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

El consumo total de CFC en países desarrollados descendió aproximadamente 51,200 toneladas anualmente en un período de 7 años. Esto significa que a este ritmo de desfasamiento, la desaparición total se daría en 11 años, es decir hacia 1997. La realidad es que para el primer trimestre de 1997, los países desarrollados han desfasado prácticamente el uso de CFC en este sector. La Tabla 2.3 muestra el crecimiento en el uso de HCFC para este sector.

Tabla 2.3: Consumo de HCFC en la elaboración de espumas flexibles de poliuretano durante 1993

Región	Toneladas 1993
Trozos	
Norteamérica	110
Europa Occidental	100
Este de Europa	50
Medio oriente y Africa	0
Centro y Sudamérica	0
Japón	10
Región Asia Pacifico	0
Total trozos	270
Total moldeado	0
Total	270

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

Es evidente que las cantidades utilizadas son muy inferiores para HCFCs. Esto es debido principalmente a la existencia de otras alternativas como el cloruro de metileno.

2.3.2 Consumo Global de Espumas Rígidas

A continuación se hará una descipción del consumo por productos que usan espumas rígidas. Estos productos incluyen: refrigeradores y hieleras, otros electrodomésticos, paneles para la construcción, productos espreados y otras aplicaciones.

REFRIGERADORES Y HIELERAS

El uso global de CFCs para la elaboración de espumas para el aislamiento de refrigeradores y hieleras en 1993 fue de 32,100 toneladas. En 1993, muchos productores de este sector ya habían llevado a cabo reducciones muy significativas en el contenido de CFC-11 de sus fórmulas, cuando las condiciones eran adecuadas. Sin embargo, en algunos mercados como Estados Unidos, otros factores, incluyendo las regulaciones de energía, aspectos de seguridad, y la necesidad para desarrollar forros plásticos resistentes al ataque de los nuevos agentes espumantes, han limitado la reducción de la industria en el consumo de estos agentes.

En 1993 el consumo global en este sector ascendía a 32 100 toneladas de CFC. El consumo desglosado por región se muestra en la Tabla 2.4

Tabla 2.4: Consumo global de CFC en el aislamiento de refrigeradores y hieleras durante 1993

Región	Toneladas
Norteamérica	8 600
Europa Occidental	4 400
Este de Europa	2 800
Medio oriente y Africa	2 200
Centro y Sudamérica	1 900
Japón	2 300
Región Asia Pacifico	9 900
Total	32 100

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

El consumo más importante, lo representa la región de Norteamérica y la región de Asia Pacífico, esta situación es debido a la rápida sustitución de CFCs por HFCs en la región de Europa. Esta situación se puede apreciar en la Tabla 2.5.

En 1993 el consumo de HCFCs en refrigeradores era relativamente bajo. Una variedad de productos químicos incluyendo HCFC-141b, HCFC-142b, HCFC-22 y la mezcla de HCFC-142b/HCFC-22 se iniciaron a utilizar, sin embargo, la conversión a estos productos está aun en etapa de desarrollo.

Durante 1994 la conversión a HCFC-141b se presentó de manera acelerada en el mercado de los Estados Unidos. En enero de 1995 más del 95% del CFC-11 se había convertido a HCFC, de modo que el uso anual de HCFCs crecerá aproximadamente 9,000 toneladas en ese mercado. Más del 95% del consumo de HCFC lo representa el HCFC-141b. Sin embargo los HCFCs son utilizados muy poco en el mercado europeo.

Tabla 2.5: Consumo global de HCFC en el aislamiento de refrigeradores y hieleras durante 1993

Región	Toneladas
Norteamérica	0
Europa Occidental	1 200
Este de Europa	0
Medio oriente y Africa	0
Centro y Sudamérica	0
Japón	100
Región Asia Pacifico	100
Total	1 400

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

OTROS ELECTRODOMÉSTICOS

En el subsector de otros electrodomésticos, el principal consumo de CFCs se presenta en la región de Norteamérica con aproximadamente el 40% del consumo global, Europa Occidental es la segunda región en orden de importancia con aproximadamente el 30% del consumo global. Los datos por región se presentan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Consumo global de CFCs en aplicaciones para otros electrodomésticos durante 1993

Región	Toneladas en 1993
Norteamérica	5,200
Europa Occidental	3,500
Este de Europa	400
Medio oriente y Africa	200
Centro y Sudamérica	200
Japón	800
Región Asia Pacifico	2,100
Total	12,400

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

Los productores de Norteamérica, Europa Occidental y Japón están utilizando una gran variedad de HCFCs incluyendo el HCFC-141b, HCFC-22 y la mezcla de HCFC-22/HCFC-142b. Este consumo se presenta en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Consumo global de HCFCs en aplicaciones para otros electrodomésticos durante 1993

Región	Toneladas en 1993
Norteamérica	1,200
Europa Occidental	800
Este de Europa	0
Medio oriente y Africa	0
Centro y Sudamérica	0
Japón	0
Región Asia Pacifico	100
Total	2,100

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

CONSTRUCCIÓN

El consumo estimado de CFCs para la elaboración de paneles para la construcción durante el periodo de 1986 a 1993 se presenta en la Tabla 2.8. Varios países europeos redujeron el uso de CFC-11 desde el principio de 1992 y la conversión la completaron durante 1994. Los productores de Norteamérica eliminaron el uso de CFCs a finales de 1993.

Tabla 2.8: Consumo global de CFC en la elaboración de paneles para la construcción de 1986 a 1993 (toneladas)

Región	1986	1990	1993
Norteamérica	21 700	22 700	14 000
Europa Occidental	17 100	10 600	9 200
Este de Europa	4 000	1 200	100
Medio oriente y Africa	1 800	100	800
Centro y Sudamérica	0	600	0
Japón	2 600	2 600	600
Región Asia Pacifico	3 800	500	0
Total	51 000	38 300	24 700

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

En general, los CFCs han sido utilizados por su habilidad para formar la espuma y permanecer en las células de la espuma y proporcionar buen desempeño aislante. Son utilizados también porque son químicos inertes que no reaccionan con otros productos utilizados para elaborar las espumas. Adicionalmente, no son flamables, no son tóxicos, son eficientes y tienen puntos de ebullición adecuados y baja solubilidad en el polímero de poliuretano formado, en el que se disuelven y reducen la viscosidad del componente poliol. Sin CFCs en el proceso de producción, el componente poliol de alta viscosidad hará el mezclado; los métodos de producción sin CFCs actualmente utilizados son muy difíciles de operar, debido a la mala solubilidad de la mezcla.

En los Estados Unidos, las empresas manufactureras de paneles de poliuretano cambiaron al uso de HCFC-141b y en algunos casos a mezclas de HCFC-141b con pequeñas cantidades de HCFC-22. El HCFC-141b es el agente espumante que mejor reúne las características de CFC-11, especialmente en términos de conductividad. En Europa, los productores de espumas laminadas de espuma flexible han preferido el uso de iso y n-pentano o bien el uso de HCFC-141b por un período de tiempo intermedio. En Japón, en donde la producción global es mucho menor, el HCFC-141b es la opción preferida. El consumo de HCFC en 1993 totalizó 8,500 toneladas para el sector de la construcción, siendo la región de Norteamérica la que más contribuye a este consumo. La Tabla 2.9 muestra el consumo de HCFCs por regiones en este sector.

Tabla 2.9: Consumo global de HCFC en la elaboración de paneles para la construcción durante 1993

Región	toneladas
Norteamérica	6 500
Europa Occidental	1 500
Este de Europa	0
Medio oriente y Africa	0
Centro y Sudamérica	0
Japón	500
Región Asia Pacifico	0
Total	8 500

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

Los dos principales productos de acuerdo al consumo de CFCs en la elaboración de paneles para la construcción son los paneles laminados y los tipo sandwich. A continuación se presenta el consumo global de CFCs y HCFCs para los paneles tipo sandwich. Por falta de datos no se presenta el consumo para los paneles laminados, pero el consumo total para esta aplicación puede obtenerse restando de los valores de las Tablas 2.10 y 2.11, los correspondientes de las tablas 2.8 y 2.9.

Paneles en Sandwich

Muchos productores europeos y norteamericanos cambiaron el uso de CFC-11 durante el año de 1993 y completaron la conversión durante 1994. Los productores en países en vías de desarrollo estan en la etapa de formulación e implantación de sus planes de desfasamiento. El consumo estimado de CFCs para paneles en sandwich en 1993 fue de 18,800 toneladas comparado a las

24,100 toneladas usadas en 1990. El consumo por regiones se muestra en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10: Consumo global de CFC en el sector de elaboración de paneles laminares por capa (tipo sandwich) de 1990 a 1993

Región	1990	1993
Norteamérica	5 900	3 200
Europa Occidental	9 500	9 900
Este de Europa	1 600	600
Medio oriente y Africa	800	1 100
Centro y Sudamérica	500	800
Japón	3 800	400
Región Asia Pacifico	2 000	2 800
Total	24 100	18 800

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

Aunque el consumo global de HCFCs es bajo, los productores están cambiando al uso de alternativas las cuales incluyen el HCFC-141b, y mezclas de HCFC22/HCFC-142b. Existe un uso menor de los isómeros de pentano en Europa. El consumo de HCFCs se muestra en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11: Consumo global de HCFC en el sector de paneles laminados (tipo sandwich) durante 1993

Región	1993
Norteamérica	3 400
Europa Occidental	2 800
Este de Europa	0
Medio oriente y Africa	100
Centro y Sudamérica	0
Japón	200
Región Asia Pacifico	0
Total	6 500

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

La siguiente aplicación a analizar es el espreado.

Espreado

Un gran número de empresas ya han dejado de usar el CFC-11 en sus aplicaciones. El consumo estimado de CFCs para espumas espreadas en 1993 fue de 11,000 toneladas comparadas con las 12,800 utilizadas en 1990. El consumo a nivel regional se muestra en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12: Consumo global de CFC en el sector de espuma espreada de 1990 a 1993

Región	1990	1993
Norteamérica	6 500	4 100
Europa Occidental	1 500	1 900
Este de Europa	500	100
Medio oriente y Africa	500	1 200
Centro y Sudamérica	500	100
Japón	2 300	2 400
Región Asia Pacifico	1 500	1 200
Total	12 800	11 000

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

Un buen número de empresas han utilizado el HCFC-141b como la alternativa de preferencia. La Tabla 2.13 presenta los consumos regionales de estos compuestos.

Tabla 2.13: Consumo global de HCFC en el sector de espuma espreada durante 1993

Región	1993
Norteamérica	800
Europa Occidental	200
Este de Europa	0
Medio oriente y Africa	0
Centro y Sudamérica	0
Japón	1 300
Región Asia Pacifico	0
Total	2 300

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

OTRAS APLICACIONES DE ESPUMAS DE POLIURETANO RÍGIDO

El consumo estimado de CFCs para otras espumas rígidas de poliuretano en 1993 fue de 7,000 toneladas comparadas con las 11,300 toneladas en 1990. El consumo a nivel regional se proporciona en la Tabla 2.14. Los datos son reportados incluyendo a los tres subsectores mencionados, debido a que no existe información para cada una de estas aplicaciones de forma individual. Para los paneles laminados continuos se obtuvieron reducciones significativas de CFC-11 durante 1993.

Tabla 2.14: Consumo global de CFC en otras aplicaciones del sector de espumas rígidas de 1990 a 1993

Región	1990	1993
Norteamérica	1 300	2 000
Europa Occidental	7 700	2 500
Este de Europa	1 000	300
Medio oriente y Africa	200	200
Centro y Sudamérica	200	100
Japón	400	0
Región Asia Pacifico	500	1 900
Total	11 300	7 000

Fuente:UNEP , Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

Un gran número de empresas europeas han completado la transición de CFC-11 a productos alternativos para tubos concéntricos. Muchas empresas europeas ya no utilizan el CFC-12, debido a restricciones locales. En Norteamérica la conversión fue generalmente hacia el uso de HCFC-141b para paneles y aislamiento de tubos, y hacia hidrocarburos y dimetil éter para espumas unicomponentes. El consumo global de HCFCs para los sectores descritos se muestra en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15: Consumo global de HCFC en otras aplicaciones del sector de espumas rígidas durante 1993

Región	1993
Norteamérica	800
Europa Occidental	1 000
Este de Europa	0
Medio oriente y Africa	0
Centro y Sudamérica	0
Japón	0
Región Asia Pacifico	0
Total	1 800

Fuente:UNEP, Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee, 1994

2.4 CONSUMO EN MÉXICO

México fabrica poliuretano rígido y flexible, poliestireno, y espumas de polietileno con CFC-11 y CFC-12 en forma de agentes espumantes. En 1989, la espuma de poliuretano rígido y flexible representa más del 95% del CFC-11 usado en espumas, mientras que la espuma que no tiene poliuretano representa todo el CFC-12 usado en espumas. Actualmente, la espuma de poliuretano flexible es fabricada sin CFC-11 cumpliendo con el convenio voluntario entre SEDUE y la Asociación Industrial de Espuma de Poliuretano. Las espumas de poliuretano son usadas en muebles, camas, tapetes, interiores de automóviles y otras aplicaciones de asientos de transporte, la espuma rígida de poliuretano es usada para aislamiento en refrigeradores, congeladores, edificios, tanques, tuberías, y puertas. El mercado para espumas rígidas que son aplicadas para uso en los paneles de refrigeradores está creciendo a causa de un aumento en exportaciones de paneles de construcción y equipos de refrigeración. Actualmente no hay información disponible sobre la producción y aplicación de espuma de poliestireno, polietileno, y otras espumas que no usan poliuretano en México.

El consumo total de CFC en espumas fue 1,629 toneladas métricas en 1991, o 20% de las 8,128 toneladas métricas de CFC consumidas en 1989. está proyectado que el consumo va a crecer un 10% anual debido al aumento en la demanda de productos que usan espumas de poliuretano en el mercado domestico y en el mercado de exportación. El consumo de CFC-12 como agente espumante se estima de 570 toneladas métricas en 1990. Hay aproximadamente nueve usuarios en México, de los cuales todos usan

tecnología extranjera y por lo menos tres son subsidiarias de firmas europeas y estadounidenses. Los usuarios de espumas incluyen dos fabricantes de equipos grandes de refrigeración y un número desconocido de fabricantes de productos de paneles y aislantes. Probablemente existen cientos de firmas pequeñas e individuales que usan espumas.

La producción total de CFC (la cual consiste enteramente de CFC-11 y CFC-12) en México fue estimada en 9,982 toneladas métricas para 1991. DuPont y Quimiobásicos producen CFC-11 y CFC-12 en tres plantas, dos de ellas pertenecen a Quimiobásicos y se encuentran en Monterrey Nuevo León, teniendo una capacidad de producción de aproximadamente 14,000 toneladas métricas. La tercera planta (de DuPont) tiene una capacidad de 4,000 a 7,000 toneladas métricas al año. La producción actual representa el 35% de la capacidad de estas plantas. Cuando la producción de CFC-11 y CFC-12 sea eliminada, las plantas pueden ser ajustadas para producir HCFC22. Este cambio da lugar a una reducción de aproximadamente 50% de la capacidad de producción. Según fuentes industriales, el cambio de CFC-11 y CFC-12 a HCFC-22 no requiere una inversión de capital adicional, simplemente cambios en las condiciones de operación, sin embargo el costo de materiales químicos no es el mismo.

2.4.1 Importaciones y Exportaciones

En 1988, México importó 400.3 toneladas métricas de CFC-113 y 44.3 toneladas métricas de CFC-114, aproximadamente 1,800 toneladas de CFC 11 fueron exportadas a los EEUU y a Latinoamérica en 1989. No hay

cifras de exportación disponibles más recientes, por lo tanto no se puede calcular el consumo domestico para estos años.

Actualmente hay información disponible sobre importaciones y exportaciones de productos fabricados con o que contienen sustancias controladas. Casi toda la materia prima necesaria para la elaboración de productos con espuma es producida internamente, con la excepción del 4,4,1-disocianato de metileno. Las importaciones de espumas terminadas representan una cantidad pequeña de la espuma flexible que se consume en México y aproximadamente 40% del volumen de espuma rígida. Una porción relativamente pequeña de la producción de espuma es exportada (más que todo a los EEUU) como paneles de construcción y equipos de refrigeración.

3 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

En este capítulo se analizan las alternativas tecnológicas que existen para sustituir a los CFCs para la industria del poliuretano. Es importante recalcar que se abarcará el aspecto duro de la tecnología ("hardware"), que se refiere a máquinas, herramientas y equipos. Los aspectos relacionados a sistemas y procedimientos ("software") y conocimientos ("know How"), se analizarán de manera indirecta en el desarrollo de la tesis.

3.1 DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS: DESEMPEÑO ACTUAL

Un gran número de materiales pueden ser utilizados como agentes espumantes. Entre ellos se encuentra el dióxido de carbono, los hidrocarburos, los CFCs y HCFCs. Para que el agente sea considerado como buen espumante se requiere que:

- No reaccione con el plástico
- Sea lo suficientemente soluble en la fase líquida, pero insoluble en la fase sólida
- Posea puntos de ebullición y presión de vapor adecuados

Para algunas espumas plásticas (particularmente las espumas con células cerradas), se requieren propiedades adicionales para producir características finales del producto específicas o para facilitar el proceso de manufactura. Algunos ejemplos son los siguientes:

- Aislamiento a base de espumas con células cerradas que requieren un agente espumante con baja conductividad térmica para proporcionar una alta eficiencia aislante;
- Algunas espumas termofijas, especialmente las espumas flexibles de baja densidad y de células abiertas que dependen del agente espumante para absorber el calor del polímero fundido; y
- Espumas resistentes de células cerradas (especialmente las poliolefinas) que requieren que el agente espumante proporcione estabilidad dimensional durante su período de vida.

Aunado a lo anterior, es preferible el uso de agentes espumantes no flamables, ya que esto mejora las condiciones de seguridad del proceso y aumenta el desempeño del producto a altas temperaturas. Debido a que los CFCs poseen estas características, y eran hasta hace poco tiempo relativamente baratos, fueron ampliamente utilizados como agentes espumantes para la elaboración de espumas plásticas. Históricamente la industria de las espumas plásticas, ha utilizado los siguientes CFCs:[7]

- CFC 11 y CFC 13 para espumas termofijas, ya que estos agentes espumantes son compuestos en estado líquido a temperatura ambiente (25°C); y
- CFC 12 y CFC14 para espumas termoplásticas ya que estos agentes espumantes son gases de bajo punto de ebullición.

Un segundo grupo de agentes espumantes lo representan los CFCs parcialmente halogenados (HCFCs). Los cuales contienen por lo menos un átomo de Hidrógeno en la molécula y un enlace de carbono-hidrógeno. Los HCFCs tienen menor estabilidad química que los CFCs y tienden a descomponerse en la

parte baja de la atmósfera. En consecuencia, la habilidad de los HCFCs para migrar a la estratosfera y descomponerse en cloro, es mucho menor que la de CFCs. Los productos de esta familia incluyen:

- HCFC 22 (CHF_2Cl_2)
- HCFC 142 b (CH_3CF_2Cl)
- HCFC 141 b (CH_3CFCl_2)
- HCFC 123 ($C_2HF_3Cl_2$)

Actualmente los compuestos HCFC 22 (1 isómero), HCFC 142b (1 isómero) y HCFC 141b (1 isómero) se encuentran disponibles comercialmente. El HCFC 123 (3 isómeros) ha sido evaluado toxicológicamente y ha cubierto las normas toxicológicas pertinentes, pero aún no se encuentra disponible en el mercado. Los HCFCs se han convertido en la alternativa predominante para reemplazar a los CFCs en la mayoría de las aplicaciones de poliuretano, poliestireno extruido y espumas fenólicas.

Debido a que los HCFCs contienen cloro y contribuyen a la destrucción de la capa de ozono, se consideran como sustancias de transición. En 1992, los miembros del Protocolo de Montreal firmaron la modificación de Copenhage, en donde se establece la disminución progresiva de estos compuestos a partir de 1996 hasta su desaparición en el año 2030[4]. El desfasamiento mundial de los HCFCs se ha visto afectado, principalmente debido a que algunos países han desarrollado políticas regionales para desfasar algunos productos químicos específicos que se encuentran incluidos en la formulación de los HCFCs. Los HCFCs representan la principal alternativa existente para espumas cuyo fin es el aislamiento térmico.

En aplicaciones, como empaques y recubrimientos, el uso de los HCFCs se ha eliminado casi en su totalidad. Sin embargo se están llevando a cabo esfuerzos de investigación importantes para encontrar sustitutos a largo plazo que eliminen la necesidad del uso de los HCFCs en aplicaciones donde su uso es indispensable.[17] Parte del esfuerzo dirigido a resolver esta problemática implica la sustitución de los HCFCs con otros agentes espumantes, como son los HFCs (fluorocarbonos parcialmente halogenados), hidrocarburos, procesos alternativos u otros agentes espumantes.

Los hidrocarburos son alternativas que se están utilizando en un gran número de aplicaciones de espumas, incluyendo al ciclopentano como agente espumante en refrigeradores y hieleras, y varias formas de pentano en la elaboración de poliestireno extruido, y aplicaciones de espumas fenólicas y de poliuretano. Los Hidrofluorocarbonos (HFCs) también son utilizados para sustituir a los CFCs y HCFCs en algunas aplicaciones limitadas, como es el caso de la utilización del HFC 152a en poliestireno extruido y en espumas de poliuretano para empaque. Mientras que los HFCs pueden ser considerados como una alternativa en estas aplicaciones, no es posible aplicarlos en otros procesos. En general los HFCs son considerados como alternativas a largo plazo para sustituir a los CFCs y HCFCs en el sector de aislamiento.

La Tabla 3.1 sumariza las distintas alternativas disponibles para el sector de espumas plásticas. Las columnas actual y largo plazo se refieren a lo siguiente:

- Actual - Alternativa que actualmente tiene aplicación en un área específica (ésta clasificación varía de acuerdo a la región)

- Largo Plazo - Alternativa que requiere de un mayor período de tiempo para ser investigada, y determinar si puede ser implementada o se debe descartar como opción.

Estas opciones por lo general serán evaluadas para decidir si son implementadas después de 1997.

Tabla 3.1: Alternativas Disponibles para sustituir a los CFCs en el Sector de espumas rígidas de poliuretano

TIPO DE POLIURETANO	ACTUAL	LARGO PLAZO
Rígido (refrigeradores y hieleras domésticas)	• CFC-11 reducido • Ciclopentano • HCFC 141b	• HFCs (245, 356, 365) • Paneles con vacío • Hidrocarburos
Otros aparatos domésticos	• CFC-11 reducido • HCFC-141b • HCF-22 • MezclaHCFC-22/HCFC142b Pentano • CO2	• HFCs (245, 356, 365) • Pentanos • CO_2 (agua) • Tecnología AB
Paneles de laminado flexible	• HCFC 141b • Pentanos • HCFC 22	• HFCs (245, 356, 365) • Pentanos
Paneles laminados (tipo sandwich)	• CFC-11 reducido • HCFC 141b • HCFC 22 • Mezcla HCFC 22 / HCFC 142b • Pentano • HFC 134a HCFC 141b	• HFCs (245, 356, 365) • Pentanos • CO_2 (agua)
Espreado	• CFC 11 reducido • HCFC 141b • CO_2 (agua)	• HFCs (245, 356, 365) • CO_2 (agua)
Tablas plegadizas	• CFC 11 reducido • HCFC 141b • Pentanos	• HFCs (245, 356, 365) • CO_2 (agua o inyectado)
Tuberías	• CO_2 (agua) • HCFC 22 • Mezclas de HCFC22 / HCFC 142b • Pentanos • HCFC 141b	• HFCs (245, 356, 365) • CO_2 (agua)

Tabla 3.1 Continuación

Flexible: formas plegadizas	• Amplia gama de polioles • CO_2 (agua e inyectado) • Agentes ablandadores • Cloruro de metileno • Metil cloroformo acetona • Tecnología AB • Aumento de densidad • HCFC 141b • Pentano • Tecnología MDI Tecnologías alternativas (E-Max,enfriamiento acelerado,presión variable)	• CO_2 (inyectado, tecnologías alternativas)
Moldeado	• Aumento de densidad • Metil cloroformo • Amplia gama de polioles • CO_2 (agua) • HCFC 141b	• Amplia gama de polioles • CO_2 (agua)

Los datos mostrados en la Tabla 3.1 reflejan las principales alternativas tecnológicas actualmente existentes para sustituir a los CFCs en los diferentes procesos. A continuación se hará una descripción de cada una de ellas por ramo. En la descripción de alternativas se seguirá un formato similar al del capitulo 2. Los tópicos a cubrir en esta sección serán: opciones técnicas para reemplazar a los CFC, sustitución del producto y conclusiones. Las opciones técnicas incluyen las opciones que reducen el potencial destructor de ozono, a las cuales se les identifica como opciones con SDO reducidas. A las opciones que incluyen el uso de compuestos que no dañan la capa de ozono se les conoce como opciones con cero Potencial Destructor de Ozono (PDO). En algunos sectores se incluye información sobre recuperación ya sea en la forma de reciclado o métodos de destrucción.

3.2 DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS: ESPUMAS FLEXIBLES

A continuación se hará una descripción de las alternativas tecnológicas actualmente existentes para los procesos de producción de espumas flexibles de poliuretano. Las alternativas a describir se presentan en 5 grandes grupos los cuales son: técnicas de conservación, agentes espumantes alternativos, modificaciones químicas, tecnologías de manufactura alternativa y sustitución del producto.

3.2.1 Conservación

Las técnicas de conservación son aquellas tecnologías y procedimientos para reducir el uso de CFCs a través de una mejor adecuación de las prácticas de administración, reformulación, recuperación y reciclado. La administración adecuada en el uso de los CFCs pueden permitir que una planta ahorre hasta un 10% del uso de CFCs, algunas recomendaciones son las siguientes:

- Usar sistemas de descarga cerrados
- Evitar el uso de CFCs para ajustar la viscosidad
- Minimizar el índice de TDI

La recuperación y reciclado se práctica en un gran número de plantas en Europa en escala industrial. Los AEA son absorbidos en carbón activado y subsecuentemente absorbidos a través de una línea de regeneración de vapor o nitrógeno. Una condición requerida es la reducción de la ventilación del proceso, la cual puede ocasionar problemas de exposición en trabajadores. La recuperación

de las emisiones de curado es técnicamente difícil, reduciendo la eficiencia global obtenida a menos del 50%. Los costos de inversión y operación son altos.

3.2.2 Agentes Espumantes Alternativos

A continuación se hará una descripción de las alternativas tecnológicas conocidas como agentes espumantes alternativos. Las alternativas que se describen son: cloruro de metileno, metilcloroformo, HCFCs, acetona, tecnología AB, pentano y proceso Car-dio.

CLORURO DE METILENO

La combinación de propiedades del cloruro de metileno, entre ellas su bajo punto de ebullición, su relativa propiedad inerte, relativa baja toxicidad y su virtualmente no flamabilidad han ocasionado su uso como AEA en la industria de espumas. Su bajo potencial de creación de ozono fotoquímico (PCOF) y cero PDO ha aumentado su uso dramáticamente en los últimos años, logrando ser un sustituto adecuado para los CFCs en la elaboración de espumas de poliuretano. La volatilidad del cloruro de metileno puede contrarrestar estas bondades, debido a que se pueden alcanzar altas concentraciones en el área de producción, requiriéndose el manejo adecuado para evitar la sobre exposición. Las regulaciones ambientales y de salud existentes pueden limitar el uso de este compuesto como AEA.

Actualmente el Cloruro de metileno (CM) es la opción preferida en Norteamérica, el Reino Unido y muchos países en vías de desarrollo.

Regulaciones recientes pueden limitar su uso en el futuro, lo cual coloca al CM como una opción intermedia, principalmente en los Estados Unidos.

El CM es capaz de reemplazar a los CFCs sin limitaciones significativas a bajo costo. Sin embargo la curva de aprendizaje puede ser considerable a medida que el proceso es más sensible Adicionalmente la contaminación del CM con acero puede tener efectos abrasivos. Se recomienda el uso exclusivo del CM con "grado uretano".

Debido a su alta capacidad térmica es usado con menor éxito en la elaboración de PU moldeado.

METILCLOROFORMO (MCF)

El metilcloroformo puede ser utilizado en situaciones en donde el uso de CM sea restringido. Sin embargo, el MCF es clasificado como una SDO, y está sujeto a la misma calendarización de desfasamiento que los CFCs, por lo que esta opción representa una alternativa intermedia. Los costos son más altos que en el caso del CM, y el procesamiento es más difícil, debido a su mayor capacidad térmica.

EL MCF para el espumado flexible no es permitido en algunas regiones de Europa y Canadá.

HCFCs

El HCFC-141b es una alternativa técnicamente viable para las espumas flexibles, pero es una SDO, por lo que representa una alternativa intermedia. Un

gran número de países han regulado el uso de los HCFCs en la elaboración de espumas de PU flexible y se cree que existen otras alternativas con menor impacto ambiental.

ACETONA

La acetona se ha probado como un sustituto adecuado para el CFC-11. Sin embargo se deben tomar las medidas pertinentes debido a su flamabilidad. Se requiere aproximadamente el 60% de la cantidad requerida si se estuviera utilizando CFC-11. Los costos son similares a los del cloruro de metileno debido al cubrimiento de los pagos por licencias.

TECNOLOGÍA AB

Esta tecnología utiliza la reacción entre TDI y ácido fórmico para crear un AEA, cuya consistencia esta compuesta por cantidades iguales de CO y CO2. Debido a que esta reacción es exotérmica, no es posible el reemplazo total del CFC. Se requieren modificaciones substanciales de equipo y el monitoreo del CO es altamente recomendable. Esta tecnología es utilizada en algunas empresas europeas, y no ha tenido aceptación en otras regiones, debido a su limitada aplicabilidad y a consideraciones de seguridad.

PENTANOS

Por lo menos una empresa en los Estados Unidos ha reportado el uso de pentano como un AEA. Debido a la flamabilidad del pentano se requieren extensas medidas de seguridad similares a las utilizadas cuando se emplean hidrocarburos en la elaboración de poliestireno/polietileno extruido y acetona en la elaboración de poliolefinas flexibles. Solo aproximadamente el 70% de dosificación es necesaria comparado con la cantidad requerida de CFC-11.

PROCESO CAR-DIO

La adición de CO_2 en exceso en el sistema de espumado durante o previo a la mezcla de los compuestos químicos ha estado sujeta a investigación por un período de tiempo considerable. En 1993 una empresa inició el uso de esta tecnología; en este proceso los AEA son reemplazados por la introducción física de CO_2. El uso de CO_2 presenta a la vez una serie de retos en el sistema:

- La introducción de la cantidad de CO_2 suficiente en el sistema para permitir la formación de espumas de baja densidad
- Control del burbujeo que se presente a la salida de la mezcla de reacción de la cabeza mezcladora. Esto se relaciona a la rápida expansión del CO_2, el cual tiene un punto de ebullición muy bajo, bajo condiciones no presurizadas.
- Encontrar como combinar las modificaciones necesarias para acomodar el burbujeo en los procesos de las espumas que necesitan el uso de AEA y que por lo tanto no burbujean.

Los diseñadores del sistema Car-Dio han indicado que tienen bajo control estos puntos. Actualmente existen aproximadamente 10 plantas manufactureras que utilizan este proceso. En este momento se considera a esta tecnología como una alternativa que se está desarrollando y que aún no entra a la etapa de plena industrialización.. Sin embargo debido a su bajo costo de producción (debido a que el CO_2 tiene un bajo precio) y a su bajo impacto ambiental (CO_2 proveniente de recursos naturales no es SDO ni tiene Potencial de Calentamiento Global del Planeta), se considera una alternativa prometedora.

3.2.3 Modificaciones Químicas

La siguiente alternativa a describir se conoce como modificaciones químicas. Las tecnologías a analizar dentro de esta alternativa son: polioles de amplio rango, aditivos de ablandamiento y tecnología MDI.

POLIOLES DE AMPLIO RANGO

Estos polioles son capaces de proporcionar un rango mayor de dureza en la espuma y por lo tanto son capaces de sustituir al CFC-11 como agente ablandador. Algunos polioles de rango extendido permiten el uso de menores cantidades de TDI y por lo tanto reducen el grado de desprendimiento de calor durante la reacción (reacción exotérmica). Esto permite adicionalmente la reducción de la densidad de la espuma, sin embargo no es aun posible la reducción completa del CFC-11 manteniendo el rango total de producción. Se requiere el uso de tanques y sistemas dosificadores adicionales y el precio de

estos polioles es mayor que el de los convencionales. Los polioles de rango extendido son utilizados por lo general en conjunción con aditivos especiales. Los polioles de rango extendido y de amplia resistencia se utilizan con éxito en aplicaciones moldeadas.

ADITIVOS DE ABLANDAMIENTO

Una gran variedad de aditivos se han desarrollado para modificar las características químicas en la elaboración de espumas flexibles. Estos aditivos no permiten la producción de espumas debajo de los 21 Kg/m3. Algunos de estos aditivos pueden ser utilizados en conjunción con polioles de rango amplio. De esta forma, el rango mayor de dureza del poliol, las características integrales de producción del aditivo y la reducción de la liberación de calor durante la reacción proporcionan un sistema que será capaz de proveer una amplia variedad de densidades y durezas al mismo tiempo que mantienen las propiedades físicas requeridas.

TECNOLOGÍA "MDI"

El término MDI se refiere a difenilmetanodiisocianato, cuya adición en exceso con agua permite la sustitución del agente espumante. Esta tecnología también se conoce como base agua (en inglés "water blown y es muy utilizada en la elaboración de espumas moldeadas flexibles debido a las características inherentes al MDI de ablandamiento y baja liberación de calor durante la reacción, lo cual permite el uso de mayores dosis de agua en las fórmulas.

Una gran cantidad de proveedores de productos químicos ofrecen sistemas basados en MDI para la elaboración de espumas de poliuretano flexible, algunas de las principales características que ofrecen estos sistemas son las siguientes:

- No se requiere la adición de agentes espumantes alternativos para lograr el ablandamiento requerido
- Se obtienen emisiones de isocianato menores
- Curado rápido
- Bajo grado de emisión de calor (reacción exotérmica) lo cual permite la aplicación de mayores dosis de agua.

3.2.4 Tecnologías de Manufactura Alternativa

Un gran numero de tecnologías han estado surgiendo recientemente, estas alternativas pueden ser clasificadas como reemplazos mecánicos en la elaboración de espumas flexibles de poliuretano, sin embargo muchas de estas tecnologías tienen las siguientes características:

- Tienen Impacto Ambiental (debido al uso de CM, MCF, acetona, pentano y HCFCs) o
- No son capaces de obtener un reemplazo total (polioles de amplio rango y aditivos)

Así también las regulaciones en muchos países han intensificado su enfoque en las emisiones de los AEA y la necesidad de controlarlas. Esto, a su vez acarrea el problema de las emisiones fugitivas. Las emisiones fugitivas representan entre el 45% y el 70% de las emisiones totales en la elaboración de poliuretano flexible. La

captura y tratamiento de estas emisiones en una planta tradicional es técnicamente difícil, y por lo general los costos prohiben el uso de estas. Tecnologías tradicionales como:

- incineración
- Adsorción líquida, o
- Adsorción de carbón

Son todas adecuadas para el tratamiento de bajas concentraciones en áreas de alto volumen como cuartos de almacenamiento y curado, de donde estas emisiones por lo general se originan. Las tecnologías mecánicas permiten la integración del área de curado en el control de la emisión o permiten aun eliminar el uso de todos los agentes espumantes alternativos.

De la amplia gama de tecnologías disponibles, se describen las que se consideran más prometedoras en términos de impacto ambiental [9]. Las alternativas que se describen en esta sección son: tecnología E-MAX, sistemas de enfriamiento acelerado, enviro-cure, proceso de curado rápido y sistemas de presión variable.

TECNOLOGÍA E-MAX

El proceso de E-MAX combina los pasos de producción y curado encapsulando el producto del mezclado en un molde a medida que la mezcla espumante es introducida a la línea de espumado. El molde permite la captura y recolección de las emisiones del proceso, mediante la aplicación de bajas corrientes de aire. Actualmente existe una instalación en los Estados Unidos a gran escala. A nivel piloto se ha reportado la recuperación del 85% de los AEA. A nivel industrial, la

recuperación del cloruro de metileno en el mismo rango (80-90%) y la reducción de las emisiones de TDI a niveles no detectables han sido reportadas. Sin embargo los costos son altos, el ajuste técnico del equipo no es posible y el proceso de expansión complica el control del proceso. El hecho de que no se han construido mas instalaciones indica que el proceso no es económicamente atractivo.

SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO ACELERADO

El calor generado de la reacción entre el aire y el TDI limita el uso de la técnica de generación química del CO_2 como agente espumante único. La disipación acelerada de esta energía permitiría a esta técnica incrementar la cantidad de CO_2 que puede ser generado químicamente hasta un nivel en el cual se permita la eliminación completa en el uso de AEA para el propósito de reducir la densidad. Esto es logrado mediante el enfriamiento acelerado

El enfriamiento acelerado no es patentable y muchas compañías operan diseños propios de esta tecnología. El PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) y el Banco Mundial ofrecen un paquete que incluye una serie de posibles diseños para los productores de espuma en caja ("unicure") el cual puede ser manufacturado localmente como parte de algún proyecto financiado por el Fondo Multilateral. Proyectos de este tipo ya han sido aprobados en Indonesia, Malasia y Filipinas.

Existen también varios sistemas en el mercado que aplican esta tecnología con diversas variantes, algunas veces incluyendo el tratamiento de las emisiones de

procesos tales como el Enviro-Cure, Rapid Cure Process, y los sistemas de presión variable.

ENVIRO-CURE

El proceso de Enviro-cure está diseñado para eliminar la necesidad de agentes espumantes alternativos para propósitos de enfriamiento, y para la reducción de densidad. Las funciones adicionales de los agentes espumantes alternativos como el ablandamiento de la espuma, pueden ser fácilmente reemplazadas por técnicas químicas de ablandamiento. El Enviro-Cure logra esto por medio de un área de acondicionamiento, diseñada para el enfriamiento rápido de los bloques de espuma a través de un ciclo cerrado de aire. De esta forma las emisiones se reintroducen en la espuma que funciona como un filtro de emisiones. El proceso se adecua muy bien al proceso Vertifoam (debido a sus paredes delgadas). Actualmente se ha instalado una unidad en China bajo el apoyo del Fondo Multilateral. El proceso está patentado y sujeto a cargos de licencia.

Las consecuencias económicas en la utilización de este proceso depende de las condiciones locales. En regiones en donde las regulaciones propuestas permiten el uso de todos los agentes espumantes alternativos, se pueden obtener ahorros significativos comparado con el incremento alternativo de densidad. Comparando el uso de CM, el proceso generará mayores costos en productos químicos, adicionalmente a los costos de capital y de operación, pero permite ahorros de espacio debido a la eliminación de la necesidad del área de curado.

La retroalimentación de futuras plantas que adopten este proceso será requerida para evaluar las bondades de este proceso.

PROCESO DE CURADO RÁPIDO

Similar al proceso de Enviro-cure. El proceso de enfriamiento rápido está diseñado para eliminar completamente la necesidad de agentes espumantes alternativos, sin sacrificar la calidad o rango de productos. Para lograr esto, se requiere un dispositivo en dos etapas que se anexa directamente al túnel de producción de espuma, reemplazando el área convencional de curado/enfriamiento.

Se requieren reformulaciones significativas para implementar las técnicas de ablandamiento y para reducir la rigidez intracelular originada por la eliminación del TDI no reaccionado en la fase inicial de enfriamiento. El proceso de curado rápido está patentado y requiere licencias de uso. Los costos de los productos químicos son muy similares al de espumas elaboradas con cloruro de metileno. Los costos capitales dependen en gran medida de las características particulares de la empresa. El proceso hasta ahora es aplicado en los Estados Unidos por una empresa y otra más en Egipto.

SISTEMAS DE PRESIÓN VARIABLE

Es bien sabido que la eficiencia de espumado aumenta al disminuir la presión atmosférica. Esto permite la manufactura de espumas de baja densidad a grandes altitudes, con menos o sin la necesidad de utilizar AEAs, debido a una mayor eficiencia del CO_2 generado con la mezcla del agua con el TDI. Este principio puede ser aplicado a menores altitudes al encapsular la línea de producción de espumas y posteriormente reducir la presión del proceso. Análogamente, el

aumento de la presión disminuye la efectividad de la generación de gas proveniente de la reacción del agua con el TDI, y de esta forma permite la generación de mayores niveles de urea (un subproducto de la reacción). Actualmente dos compañías ofrecen tecnología libre de SDO basadas en el principio de la presión variable.

La tecnología "VPF" (Variable Pressure Foaming) - Se dirige a la producción continua de espumas. Actualmente existen dos empresas que han operado desde 1993 con este principio con buenos resultados. La tecnología está patentada y disponible en el mercado mediante un contrato de licencia. Los requerimientos de capital para esta tecnología son altos aproximadamente de 3 a 5 millones de dólares.

La tecnología "CEF" (Controled environment Foaming")- se dirige al mercado de espumas en caja utilizando esencialmente la misma tecnología, pero es drásticamente menos compleja.

3.2.5 Productos Sustitutos

Los productos sustitutos representan el último grupo de alternativas a describir para la sustitución de CFCs en la producción de espumas flexibles de poliuretano. En esta sección se analizan los principales aspectos asociados a la sustitución, aunque actualmente no existen parámetros que indiquen que la sustitución de CFCs en el poliuretano flexible se haya llevado a cabo en sus principales aplicaciones (automotriz, mueblera), el poliuretano flexible posee otras características que lo colocan bajo escrutinio como es su flamabilidad, la cual representa una amenaza a su viabilidad en ciertas aplicaciones de alto riesgo y

una causa mas realista para su sustitución en comparación a otras características como el costo incremental que surge con el reemplazo de los CFCs.

Las tasas de sustitución pueden ser diferentes en aplicaciones técnicas como la acústica, filtración, empacado, etc., en donde el poliuretano flexible tenía una menor penetración en el mercado. Sin embargo, en esta área los agentes espumantes alternativos nunca representaron un papel significativo en el proceso de producción y en el reemplazo de CFCs no representa una situación de importancia. Por otro lado el desarrollo de espumas a presión variable puede lograr que las espumas de poliuretano flexibles sean más competitivas en el empacado mediante la posible introducción de un mayor contenido de poliuretano.

Los principales productos sustitutos para las espumas de poliuretano flexible lo representan las fibras de poliester. Las cuales actualmente se utilizan como un envoltorio externo sobre la espuma de poliuretano para proporcionar una sensación suave al tacto. La sustitución total de fibras de poliester por poliuretano puede llevarse a cabo en aplicaciones de baja tensión como es el caso de respaldos de muebles, o recubrimientos externos, sin embargo tiene un uso limitado en aplicaciones de alta tensión tales como asientos debido a sus altas propiedades de compresión.

3.2.6 Conclusiones

- El CFC-11 ha sido eliminado de procesos de espuma flexible en trozos y moldeada en países desarrollados.

- Actualmente la principal alternativa técnica es el cloruro de metileno, sin embargo, su futuro es incierto debido a las regulaciones para su control cada vez más exigentes.
- Las regulaciones actuales que se refieren a las emisiones, cada vez presionan mas el uso de los AEA, a excepción del CO_2 inyectado.
- Sin los AEA, la industria de espumas flexibles utilizará varios productos químicos y procesos como alternativas
- Actualmente no existe una alternativa clara que sea mejor a las demás, por lo que varias opciones pueden ser utilizadas
- Aun falta mas desarrollo de las tecnologías existentes, y se espera que en el futuro cercano emerjan opciones alternativas.
- La sustitución a gran escala de las espumas de poliuretano por productos sustitutos no es muy probable.

3.3 DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS: ESPUMAS RÍGIDAS

A continuación se hará una descripción de las principales alternativas tecnológicas de sustitución de CFCs en la elaboración de espumas de poliuretano para los siguientes productos: refrigeradores y hieleras, otros electrodomésticos, paneles para la construcción laminados y tipo sandwich, productos espreados y otras aplicaciones de espumas de poliuretano rígido.

3.3.1 Refrigeradores y Hieleras

Las alternativas a describir en esta sección se clasifican en 5 grandes grupos los cuales son:

- Opciones con sustancias destructoras de ozono reducidas.
- Opciones con cero Potencial Destructor de Ozono.
- Opciones a largo plazo.
- Opciones de recuperación/reciclado/destrucción de CFCs
- Opciones de sustitución de producto.

A continuación se hace una descripción de cada una de ellas.

OPCIONES CON SUSTANCIAS DESTRUCTORAS DE OZONO REDUCIDAS

Debido a que la disponibilidad y características de desempeño de las opciones con cero Potencial Destructor de Ozono son inadecuadas para reunir los requerimientos del mercado, es una práctica común (en algunas áreas) el utilizar opciones con PDO reducido (tecnologías de transición) hasta que las opciones con cero PDO se encuentren disponibles.

La tecnología con CFC-11 reducido ha sido ampliamente probada debido a su uso en el Oeste de Europa desde 1989. Esta opción permite su adopción inmediata en países en vías de desarrollo ya que las modificaciones de equipo son mínimas o nulas. Es aplicable en lugares en donde las alternativas con cero PDO no se encuentren disponibles o implementadas.

El HCFC-141b ha sido igualmente probado y su uso es amplio en los Estados Unidos, igualmente es utilizado hasta cierto grado en algunos países como Japón. Este agente es el que proporciona la mejor capacidad aislante de los agentes actualmente disponibles. El aumento en el consumo de energía en comparación con el CFC-11 es de aproximadamente 2 o 3 % cuando se comparan fórmulas que usan porcentajes relativamente altos de agente espumante (por ejemplo las fórmulas utilizadas en Norteamérica). El agente HCFC-141b puede atacar los forros de plástico del producto, por lo que se requiere la selección cuidadosa del forro o caparazón del producto cuando se utilice este agente. Generalmente las densidades de las espumas deben aumentarse aproximadamente un 10% dependiendo del porcentaje de CFC-11 utilizado para proporcionar la fuerza estructural adecuada y la conductividad térmica óptima. En contraste, las modificaciones del equipo requeridas son mínimas. El HCFC-141b es ligeramente flamable y posee un valor de exposición límite permitida mas bajo que el CFC-11 por lo que se requiere de una mayor ventilación

El HCFC-22 se utiliza como un agente espumante de reemplazo en algunas empresas que utilizan las espumas como recubrimiento. Sin embargo su poco uso se debe principalmente a que se requiere la modificación del equipo, y a que cuenta con un desempeño energético más deficiente que el HCFC-141b.

Las mezclas de HCFC-22/HCFC-142b han sido utilizadas en Europa y Japón como una tecnología de transición. El consumo de energía es degradado de un 5% a un 10% en relación a las espumas elaboradas con CFC-11. Modificaciones en el equipo son requeridas para introducir agentes espumantes líquidos de alta presión a la fórmula con poliol.

OPCIONES CON CERO POTENCIAL DESTRUCTOR DE OZONO

Debido a la necesidad eminente de desfasar a los HCFCs, la mayor atención se ha enfocado a las opciones con cero PDO, ya que se espera que nuevos agentes espumantes que actualmente están siendo desarrollados sean utilizados en futuras generaciones. El progreso en este sentido ha sido significativo, aunque estos agentes aun no han sido probados completamente en términos de sus características toxicológicas y sus ciclos de vida efectivos, representan opciones viables en un futuro cercano. Las opciones actuales se describen a continuación.

Los hidrofluorocarbonos (HFCs) han sido estudiados extensamente debido a que se consideran los candidatos a sustituir a los HCFCs. Tienen la ventaja que cuentan con cero PDO, y la mayoría también son no flamables, sin embargo una desventaja es que contribuyen al calentamiento global del planeta.

El único HFC que ha tenido un uso significativo a la fecha es el HFC-134a. Ha sido utilizado como un agente espumante de reemplazo por un gran número de empresas que manufacturan artículos domésticos, principalmente en Europa. Tiene una conductividad térmica alta y una baja solubilidad en polioles. Estas características en conjunto provocan un aumento en el consumo de energía de hasta 5% en relación con las fórmulas con CFC reducido. Se requiere la modificación de equipo para poder manejar la alta presión del agente espumante. Es más compatible con forros de plástico que el HCFC-141b, sin embargo, debido a su menor desempeño energético y los requerimientos en la modificación del equipo, no ha sido utilizado en mercados con requerimientos energéticos rigurosos.

Los hidrocarburos, en su mayoría se encuentran disponibles en gran volumen, aunque no necesariamente en todos los mercados se les encuentra con la pureza requerida para el espumado de artículos domésticos. Estos compuestos tienen la ventaja de ser de bajo costo y libres de halógenos, con cero PDO y casi cero Potencial de Calentamiento Global (PCG). Sin embargo los hidrocarburos son flamables, tienen alta conductividad térmica y contribuyen a la formación de ozono troposferico. Es necesario el desarrollo de esta tecnología para su aplicación en mercados adicionales.

El Ciclopentano tiene la conductividad térmica más baja de los pentanos. Es utilizado ampliamente en Europa en la industria de elaboración de artículos domésticos, y en cierto grado en Japón, Australia y algunos otros países. La mayor parte de las industrias europeas han hecho el cambio directo de CFC-11 reducido a ciclopentano, aunque muchas empresas experimentaron una o varias de las demás alternativas existentes, antes de convertir el uso a ciclopentano. El ataque a los forros de plástico es mínimo, por lo que no se requiere la modificación de materiales, se requiere el aumento de la densidad de aproximadamente el 10% (en relación con espumas con CFC-11) para producir una espuma dimensionalmente estable.

Desde un punto de vista energético el ciclopentano tiene un mejor desempeño que el HFC-134a y otros hidrocarburos. Con las fórmulas actuales existe un aumento de hasta un 5% en el consumo de energía en relación al CFC-11 reducido usado en Europa y hasta 12% de aumento comparado con la tecnología de Estados Unidos que utiliza mayores porcentajes de agente espumante. El cambiar de HCFC-141b a ciclopentano como agente espumante utilizando las

fórmulas actualmente existentes resultaría en un aumento de aproximadamente el 10% en el consumo de energía para un refrigerador típico en Norteamérica.

El manejo de hidrocarburos como agentes espumantes en un proceso puede llevarse a cabo de manera adecuada si se aplican las medidas de seguridad apropiadas. Sin embargo se requieren montos significativos de inversión para la modificación de la planta, incluyendo los requerimientos para una mayor ventilación, sistemas antiexplosivos, de alarma y equipos absorbedores de desechos. Las modificaciones requeridas a las plantas pueden variar significativamente, dependiendo de las regulaciones locales. Para algunos productos espumantes, se requiere la realización de pruebas de destrucción, en algunos casos el uso de hidrocarburos se ve limitado por los estándares de seguridad establecidos.

OPCIONES A LARGO PLAZO

Todas las alternativas con cero PDO también son alternativas a largo plazo. Entre las alternativas a largo plazo, aparte de las anteriormente citadas se encuentra un buen número de HFCs líquidos (a temperatura ambiente), los cuales están en desarrollo y son considerados como sustitutos potenciales a los HCFCs. Los estudios que se están desarrollando están concentrados en encontrar las alternativas con las características de energía y seguridad comparables al HCFC-141b. Varios candidatos, incluyendo los isómeros de HFC-245, HFC-356 y HFC-365, se estan evaluados, sin que alguno de ellos se encuentre actualmente comercialmente disponible.

Las tecnologías mejoradas con pentano se han estado desarrollando para reducir la densidad de la espuma y para reducir el incremento en la conductividad térmica con fórmulas actuales. En los Estados Unidos, la industria de refrigeradores y hieleras, en conjunto con sus distribuidores están llevando a cabo un programa coordinado para evaluar a los candidatos más prometedores para la siguiente generación de agentes espumantes. Un programa similar se está llevando a cabo en Japón. Varios HFCs y el ciclopentano se están evaluando para determinar su desempeño, características aislantes y estructurales en la espuma final. Para ello se requieren cantidades considerables de material para llevar a cabo todas las pruebas de toxicidad y aplicabilidad requeridas para calificar cualquier sustancia como nuevo agente espumante. También los proveedores requieren tiempo para construir la infraestructura manufacturera para producir un nuevo producto químico, una vez que la decisión de comercializarlo se ha tomado. Debido a esto, se espera que cantidades comerciales de cualquier HFC estarán disponibles hasta el año 2000. La Tabla 3.2 sumariza la efectividad relativa de algunos agentes espumantes con cero Potencial Destructor de Ozono.

Tabla 3.2 Eficiencia energética de los diferentes sustitutos

Opción	Factor-k a 10°C (mW/m°k)	Incremento en el consumo De energía (%)
CFC-11 (Estados Unidos)	16-18	0
CFC-11 (Europa)	18.5-19.5	8.5
Ciclopentano	19.5-20.5	12
HCFC-141b	17-18	2
HFC-356mff	19.0-20.2	3.7
HFC-245fa	18.0-18.5	NA

Fuente: Dow Chemicals, 1995

OPCIONES DE RECUPERACIÓN/RECICLADO/DESTRUCCIÓN DE CFCS

Actualmente se están llevando a cabo actividades encaminadas a recuperar o destruir a los agentes espumantes cuando se dispone de los equipos viejos. Las operaciones incluyen el desmantelamiento y la recuperación parcial del CFC-11 de la espuma. La separación de la espuma de otros materiales es técnicamente difícil. Se estima que por lo menos una tercera parte del CFC-11 se disuelve en la matriz plástica y no puede ser recuperado con la tecnología actualmente disponible. Debido a esto, el método más efectivo para destruir al CFC-11 en la espuma existente es el quemarla en un incinerador apropiado.

Al considerar la recuperación y el reciclado de productos hechos con agentes espumantes alternativos, existe la preocupación por el aspecto de seguridad cuando se utiliza equipo diseñado para materiales no flamables si se encuentran presentes agentes espumantes flamables.

OPCIONES DE SUSTITUCIÓN DE PRODUCTO

El producto sustituto más prometedor en este sector industrial lo representan los paneles de vacío, para reemplazar o parcialmente reemplazar a la espuma de poliuretano. Una variedad de diseños se encuentran actualmente en desarrollo. Generalmente consisten de un panel con una barrera/contenedor impermeable que contiene un material de baja conductividad bajo vacío. Entre los materiales utilizados actualmente en la elaboración de paneles se encuentra la sílica precipitada, perlita, tierra diatomácea, lana y fibra de vidrio. Las barreras generalmente son elaboradas de materiales poliméricos laminados, generalmente

con recubrimientos metálicos o hechos a base de pequeñas láminas de acero inoxidable. Otras tecnologías que están siendo investigadas incluyen separadores cerámicos, aerogeles, hidrogeles y espumas rígidas de células abiertas como materiales de llenado, y vidrio como material de barrera. Los requerimientos de vacío oscilan desde aproximadamente 50 mbar a los que se les llama vacíos "blandos" y se utilizan en aerogeles, hasta vacíos "robustos" de menos de 0.001 mbar para separadores cerámicos.

Uno de los elementos sustitutos utilizados con mayor aceptación para aislamiento en paneles es la lana. La lana aislante pertenece al grupo genérico de las fibras minerales artificiales también conocidas como fibras vítreas (FV), sin embargo es significativamente diferente de otras FV, como las cerámicas refractarias, de refuerzo y microfibras de vidrio para aplicaciones especiales. Las lanas son diferentes no sólo en sus dimensiones, sino también en su composición química, y durabilidad, además son más vulnerables al ataque de fluidos corporales que la mayor parte de las FV, y por lo tanto no persisten en los pulmones.

La lana aislante ha sido ampliamente utilizada en el aislamiento térmico, acústico y como protector ante el fuego. Sus principales aplicaciones son en edificios, tuberías calentadores, ductos de ventilación, vehículos y artículos domésticos. La lana aislante permite un ahorro considerable de energía y por lo tanto es un material considerado como adecuado en términos de impacto ambiental. Los productos de la lana aislante no se queman o absorben humedad u olores. No permiten el crecimiento de bacterias. Su uso en edificios data del siglo pasado, su producción a gran escala inició en los años 30s. Los productos de lana aislante no contienen asbestos, material de sílice, fungicidas o biocidas y no

contienen CFCs. En la manufactura y procesamiento de los productos de lana aislante se puede producir polvo, especialmente cuando se rompen las fibras o son liberadas por la tensión mecánica (cortado, molido). La mayor parte de estas partículas son demasiado toscas para ser respirables, ya que no tienen una consistencia fibrosa.

Algunas fibras que se liberan y mantienen en el ambiente pueden ser respirables. Las concentraciones de fibras en las plantas manufactureras se encuentra por debajo de 1 fibra/ml La exposición durante la instalación de la lana aislante puede ser comparable a la concentración anterior. La razón por la cual existen concentraciones tan bajas de fibras es debido a que en su fabricación se utiliza un aceite supresor de polvo. Mayores concentraciones de polvo pueden ocurrir solo en aplicaciones especiales como es el caso de lanas espreadas o el manejo de material viejo en espacios poco ventilados. Se requiere en estos casos el uso de mascarillas.

La lana aislante se instala de tal forma que una vez aplicada, es muy poco probable que genere algún tipo de emisión. Esto se sabe debido a un gran número de pruebas que se han llevado a cabo en edificios en donde se monitorea la calidad del aire, y no se ha mostrado que estos materiales contribuyan en el incremento de las partículas fibrosas en edificios que son aislados con este tipo de material.

Pare evaluar el riesgo de exposición a este elemento, se requiere la consideración de dos aspectos importantes; los estudios epidemiológicos (estudios que buscan los patrones anormales de enfermedades, sus síntomas y causas) y experimentos con animales. También se llevan a cabo estudios de solubilidad de fluidos corporales y otras características de las fibras. En base a

estudios epidemiológicos llevados a cabo en trabajadores de la industria de la lana aislante en Europa y Norteamérica, no se ha determinado alguna relación causal entre la exposición a estas fibras y las enfermedades pulmonares cancerígenas. Los estudios realizados incluyeron cerca de 50 000 trabajadores en Europa y Norteamérica, muchos de los cuales contaban con experiencia de más de 30 años en esta industria. No existe evidencia alguna que la mesothelioma esté asociada a la exposición de la lana aislante, La mesothelioma es una serie de tumores malignos de la pleura y la cavidad abdominal, característica de la exposición a los asbestos. Para el cáncer de pulmón la evaluación muestra que se encontraron 10 casos de cáncer de pulmón contra 4 esperados, estos fueron detectados en la fase temprana tecnológica de la lana aislante. De los 10 casos de cáncer de pulmón, 4 personas tenían trabajando en esta industria periodos menores a un año.

Un gran número de científicos internacionales de organizaciones como la Environmental Protection Agency (EPA) en los Estados Unidos y el International Programme on Chemical Safety (IPCS), establecen que las pruebas de inhalación en animales son muy representativas para establecer el grado de riesgo de estos productos en el hombre. Contrario a los descubrimientos realizados para los asbestos, no se produjo un exceso de tumores en las pruebas de inhalación con fibra aislante de lana. Solamente en experimentos con animales en donde se aplican fibras ultrafinas por inyección se presentaron casos de tumores, sin embargo estas pruebas por si solas no son adecuadas para llevar a cabo una evaluación de riesgo del producto.

Actualmente ya existen antecedentes en el uso de paneles de vacío como suplementos en el aislamiento de productos domésticos. Esto se ha llevado a

cabo con el objetivo de alcanzar ciertas metas en el consumo de energía o para proporcionar máxima capacidad de almacenamiento en un producto de tamaño determinado. En los Estados Unidos dos empresas han utilizado paneles de vacío rellenos de partículas en polvo en la elaboración de refrigeradores. Aunque estas empresas elaboran en pequeña escala, y las aplicaciones se han descontinuado, se sigue desarrollando esta tecnología. En Europa existen tres compañías que producen periódicamente por lo menos un modelo que contiene paneles de vacío. En Japón existe una compañía que produce actualmente paneles de vacío. Otra empresa más había empezado a utilizar este material, pero descontinuó su uso debido a los altos costos de producción.

El consumo de energía de refrigeradores con paneles de vacío varía, dependiendo de factores como el área de cobertura, la conductividad térmica efectiva y el grosor de los paneles, el grosor de las paredes del producto y la calidad de la espuma que rodea a los paneles. Los resultados de las pruebas realizadas en los productos han variado en donde se han obtenido ahorros de 25% en hieleras utilizando una espuma con CFC-11 reducido en conjunción con paneles de vacío, y situaciones en donde el costo es equiparable con espumas con CFC-11 como es el caso de las espumas elaboradas con una conjunción de espumado por CO_2 y paneles de vacío. En general los paneles de vacío son más efectivos cuando son aplicados en cabinetas de paredes delgadas de estilo europeo que cuando se aplican a modelos con paredes más anchas como en los Estados Unidos.

Debe hacerse notar sin embargo, que el uso de paneles de vacío no afecta significativamente (con las prácticas actuales de diseño) la cantidad o calidad de la espuma aislante requerida en un refrigerador o nevera. El volumen ocupado por

los paneles es relativamente pequeño, el patrón de flujo de la espuma y la densidad son alteradas cuando se utilizan paneles, y una espuma de alta calidad es requerida para evitar los efectos de malos acabados, lo cual minimiza el valor de los paneles.

3.3.2 Otros Electrodomésticos

A continuación se hará una descripción de las alternativas tecnológicas actualmente utilizadas para sustituir a los CFCs de los procesos de producción de otros electrodomésticos. Las alternativas a describir se agrupan en 3 grupos, los cuales son:

- Opciones con CFC-11 reducido.
- Opciones técnicas a largo plazo.
- Opciones de recuperación/reciclado/destrucción de CFCs.

A continuación se presenta el desarrollo de cada uno de ellos.

OPCIONES ACTUALES DE CFC-11 REDUCIDO

Las fórmulas de CFC-11 reducido son aplicables en todas las empresas de este sector y representan un paso intermediario útil en países en vías de desarrollo, en donde no sea posible implementar una tecnología que reemplace totalmente al CFC. En la mayor parte de los países desarrollados esta tecnología ha sido reemplazada por HCFCs u otras alternativas. Las opciones a describir en esta sección son las siguientes: HCFC-141b, HCFC-22, HCFC-22/HCFC-142b, pentano y CO2 inyectado.

HCFC-141b

Esta opción ha sido elegida por un buen número de productores, particularmente aquellos que elaboran refrigeradores comerciales, hieleras y contenedores refrigerados. Esta opción ofrece la conductividad térmica más baja de todas las disponibles y es particularmente apropiada para aquellas aplicaciones en donde el maximizar el volumen interno del recipiente sea una prioridad. Sin embargo, se presenta un incremento en la conductividad térmica de hasta 5% el cual es compensado parcialmente con una mejor calidad y estructura de la espuma. Para espumas de baja densidad de aproximadamente 30-32 Kg/m^3 de densidad (con CFC-11) es necesario incrementar la densidad hasta un 10% para asegurar la estabilidad de la espuma debido al efecto ablandador del HCFC-141b en la estructura de la espuma.

Las modificaciones en planta por lo general no son extensivas debido a que la flamabilidad del HCFC-141b es ligera y por lo general son confinados para proveerles de la ventilación adecuada.

HCFC-22

Esta opción ha sido utilizada por algunos productores y es particularmente adecuada para aplicaciones como recipientes térmicos, en donde tener la mayor capacidad aislante no es lo más importante. A menos que se suministre en una forma premezclada, las modificaciones al equipo son necesarias para introducir al agente espumante bajo presión en la fórmula de poliol.

HCFC-22/HCFC-142b

Esta mezcla es adecuada para todas las aplicaciones a excepción de los contenedores refrigerados debido a que la conductividad térmica es muy alta. Al igual que con el HCFC-22 las modificaciones al equipo son necesarias para introducir al agente espumante bajo presión en la fórmula de poliol.

Pentano

Los isómeros de pentano y ciclopentano son utilizados por algunos productores de calentadores de agua y productos comerciales en Europa. Se requieren modificaciones extensivas en la planta, equipo y procedimientos para asegurar una operación segura.

CO2 (inyectado)

La inyección de bióxido de carbono es utilizada por algunos productores de calentadores de agua en donde el espacio y grosor para el aislamiento compensa la pérdida de eficiencia aislante la cual puede ser del orden de 50% durante el ciclo de vida del producto, en donde la difusión en fase gaseosa se lleva a cabo.

OPCIONES TÉCNICAS A LARGO PLAZO

A continuación se hará una descripción de las opciones técnicas a largo plazo para sustituir a los CFCs de los procesos de producción de otros electrodomésticos. Las opciones a describir son las siguientes: HFCs líquidos, pentano y CO2 inyectado.

HFCs Líquidos

Una serie de HFCs en estado líquido a temperatura ambiente están siendo desarrollados y representan los candidatos para sustituir a los HCFCs. Los principales productos son los isómeros de HFC 245, HFC 356mff y HFC365. Adicionalmente a la toxicidad, el principal parámetro será su costo y efectividad, en particular, la combinación del costo y la conductividad térmica de la espuma resultante. Otra característica importante a considerar es el potencial de calentamiento global. Estos productos estarán disponibles al mercado hasta el año 2000.

Pentano

La tecnología del pentano se encuentra aún en desarrollo y se espera que su importancia como alternativa con cero PDO se incremente.

CO2 (Inyectado)

Se espera que la tecnología de inyección de agua sea desarrollada para esta aplicación en el largo plazo.

OPCIONES DE RECUPERACIÓN/RECICLADO/DESTRUCCIÓN DE CFCs

Muchas de las consideraciones para refrigeradores domésticos y hieleras aplican a este sector. Existe un gran número de dificultades para separar la espuma del resto de los materiales utilizados. La solución más efectiva es la destrucción del CFC (en la espuma) en un equipo de incineración equipado con una planta de recuperación de energía.

3.3.3 Paneles Laminados

A continuación se hará una descripción de las alternativas tecnológicas actualmente utilizadas para sustituir a los CFCs de los procesos de producción de paneles laminados. Las alternativas se presentan en 4 grupos los cuales son:

- Opciones actuales.
- Opciones a largo plazo.
- Opciones de recuperación/reciclado/destrucción de CFCs.
- Opciones de sustitución del producto.

A continuación se hace una descripción de cada una de ellas.

OPCIONES ACTUALES

Las opciones actuales para la sustitución de CFCs de los procesos de elaboración de paneles laminados se detallan a continuación. Las opciones a describir son las siguientes: HCFC-141b, pentano, mezclas de HCFC-22/HCFC-142b y CO_2 por inyección de agua.

HCFC-141b

Esta opción es utilizada por todos los productores de Estados Unidos, en Japón y por muchos productores europeos. Ofrece la mayoría de las ventajas del CFC-11. Sin embargo, la alta conductividad del gas puede ocasionar un incremento en la conductividad inicial y final del producto durante el proceso de hasta un 5% comparado con las espumas con CFC-11. Adicionalmente, un incremento en la densidad de la espuma de hasta 10% debe ser necesario para asegurar que el producto sea dimensionalmente estable.

Pentano

Los isómeros de n e iso pentano han sido utilizados en varios países europeos desde el inicio de 1992 para responder a la demanda de productos con cero PDO. Recientemente el uso de ciclopentano se ha utilizado en menor escala. Su uso requiere extensas modificaciones en el equipo y área de producción,

procedimientos de operación especiales, esto debido a la alta flamabilidad del pentano.

La mayoría de los códigos de flamabilidad europeos pueden ser cubiertos sin necesidad de aumentar considerablemente la cantidad de retardante de fuego. Esto resulta en un incremento neto en el costo de producción, a pesar del costo mas bajo de los isómeros de n e iso pentano en comparación con el CFC-11.

Evaluaciones de esta opción en los sistemas de elaboración de paneles demuestran que todas las pruebas de flamabilidad requeridas no pueden ser cubiertas con la tecnología actualmente disponible.

El pentano es también un COV y su uso en algunos países, particularmente en los Estados Unidos puede ser inhibido.

Mezclas De HCFC-22/HCFC-142b

Estas opciones, aunque ya evaluadas, no fueron adoptadas en la misma medida que como ocurrió con el HCFC-141b y los isómeros de pentano.

CO_2(Inyección De Agua)

Ha existido una pequeña producción con 100% espumado con agua, pero la esperada deficiencia en el aumento de la conductividad térmica de más del 50% y un incremento en la densidad de aproximadamente 15% demuestra que la tecnología actual no es viable.

OPCIONES A LARGO PLAZO

A continuación se hará una descripción de las opciones técnicas a largo plazo para sustituir a los CFCs de los procesos de producción de paneles laminados. Las opciones a describir son las siguientes: HFCs líquidos y pentano.

HFCs Líquidos

Una serie de HFCs en estado líquido a temperatura ambiente están siendo desarrollados y representan los candidatos para sustituir a los HCFCs. Los principales productos son los isómeros de HFC 245, HFC 356mff y HFC365. Adicionalmente a la toxicidad, el principal parámetro será su costo y efectividad, en particular, la combinación de su costo y la conductividad térmica de la espuma resultante. Otra característica importante a considerar es el potencial de calentamiento global. Estos productos estarán disponibles al mercado hasta el año 2000.

Pentano

La aplicabilidad de esta opción puede verse incrementada con un mayor desarrollo, particularmente en relación al desempeño ante el riesgo de incendio y explosión y de la conductividad térmica.

OPCIONES DE RECUPERACIÓN/RECICLADO/DESTRUCCIÓN DE CFCs

En una espuma vieja, aproximadamente una tercera parte del CFC-11 se disuelve en la estructura plástica. Esto significa que no es técnicamente viable recuperar esta fracción aunque el balance pueda ser recuperado para reciclado por una técnica como la molienda de la espuma para romper las células.

En consecuencia, el método más efectivo para destruir el CFC-11 en estos productos es el quemado de la espuma en un incinerador que convierta el valor calorífico de la espuma en energía. En la práctica, el producto espumado no puede ser separado de otros materiales de construcción, esto refuerza la opción de la incineración como la mejor opción.

SUSTITUCIÓN DEL PRODUCTO

Muchos otros productos se encuentran actualmente disponibles para su uso como materiales de construcción. Estos productos incluyen el poliestireno expandido, fibra de vidrio, fibras minerales y vidrio celular, los cuales compiten en el mercado con el PUR y el PIR.

Es extremadamente difícil predecir los movimientos esperados en los mercados que sean consecuencia del cambio a fórmulas libres de CFCs, debido a que existen otros aspectos igualmente importantes que influyen en la selección del producto.

La sustitución directa es especialmente difícil debido a que cuando se lleva a cabo una sustitución, el material alternativo (de los actualmente existentes) tendrá una conductividad térmica mayor (menor capacidad aislante) por unidad de grosor.

Adicionalmente, existen dificultades en las aplicaciones industriales y en edificios cuando se requieren características de repelencia al agua, requerimientos de seguridad, combustibilidad o de diseño. En estas circunstancias, no es siempre fácil la sustitución directa. Esto es debido a que si una sustitución es llevada a cabo, requiere cambios considerables en el diseño y las prácticas de construcción las cuales resultarán en un incremento en el costo de construcción.

Los productos sustitutos pueden llegar a ser más competitivos si la alternativa es capaz de reducir la conductividad térmica.

3.3.4 Paneles Tipo Sandwich

A continuación se hará una descripción de las alternativas tecnológicas actualmente utilizadas para sustituir a los CFCs de los procesos de producción de paneles tipo sandwich. La descripción de las alternativas se presenta en 4 grupos los cuales son:

- Opciones con CFC-11 reducido.
- Opciones a largo plazo.
- Opciones de recuperación/reciclado/destrucción de CFCs
- Sustitución del producto.

A continuación se hace una descripción de cada uno de ellos.

OPCIONES CON CFC-11 REDUCIDO

Las fórmulas con CFC-11 reducido se han estado utilizando como una etapa intermedia en algunas empresas, pero han estado siendo desplazadas casi en su totalidad por alternativas libres de CFC en países desarrollados. Algunos productores de países en vías de desarrollo han adoptado esta tecnología como una etapa intermedia. Las características del producto se retienen excepto por un incremento en la conductividad térmica de aproximadamente 5%.

HCFC-141b

Esta opción ha sido adoptada por una gran cantidad de empresas. Las características del producto se han mantenido por completo. En algunos casos se requiere del incremento en la densidad de la espuma, particularmente en situaciones en donde la densidad es menor a 40 Kg/m^3, para contrarrestar el efecto ablandador del HCFC-141b en la estructura de la espuma.

Las modificaciones a la planta generalmente son mínimas y básicamente están encaminadas a asegurar una ventilación adecuada. Las fórmulas de la espuma han sido modificadas para satisfacer los códigos de flamabilidad nacionales.

HCFC-22

Algunos productores que utilizan técnicas continuas y discontinuas, han usado esta alternativa desde 1992. Las modificaciones al equipo son necesarias para introducir al agente espumante como líquido bajo presión en la formula de poliol.

Debido a la naturaleza impermeable de las superficies de acero, la rápida difusión del HCFC-22 hacia el exterior de la matriz espumosa (estructura molecular) no presenta problemas en la mayor parte de las aplicaciones.

HCFC-22/HCFC-142b

Esta opción es utilizada por una gran cantidad de empresas que utilizan equipos continuos o discontinuos. Al igual que el HCFC-22 se requiere una introducción presurizada con esta mezcla de agentes espumantes. Las proporciones utilizadas son de 40:60 HCFC-22:HCFC-142b, la cual elimina la naturaleza flamable del HCFC-142b mientras que su presencia compensa la difusión rápida del HCFC-22.

Pentano

Algunos productores en Europa están cambiando a los isómeros de n, iso o ciclopentano para obtener un producto con cero PDO. Su uso puede resultar en un aumento de la conductividad térmica de hasta un 5%. Modificaciones extensas y caras son requeridas en el equipo, área de la planta y procedimientos de operación debido a ala alta naturaleza flamable del pentano. Adicionalmente el pentano es un COV y su uso a gran escala está limitado.

HFC-134a

Las fórmulas basadas en HFC-134a se usan en las técnicas discontinuas. Las fórmulas pueden ser suministradas en una forma premezclada lo cual incrementa la necesidad de modificaciones para vertirlo como líquido bajo presión a la fórmula de poliol. Existe un incremento en la conductividad térmica de aproximadamente 10% en comparación con las espumas con CFC-11.

CO_2(Inyección de Agua)

Existe un pequeño uso para esta opción, particularmente en aplicaciones donde un óptimo aislamiento térmico no es una prioridad.

OPCIONES A LARGO PLAZO

A continuación se hará una descripción de las alternativas tecnológicas a largo plazo actualmente utilizadas para sustituir a los CFCs de los procesos de producción de paneles tipo sandwich. Las opciones a describir son las siguientes: HFCs líquidos, pentanos y CO2 inyectado.

HFCs Líquidos

Un buen número de HFCs líquidos (a temperatura ambiente) han estado siendo estudiados como sustitutos potenciales a los HCFCs. Estos estudios están concentrados en encontrar las alternativas con las características de energía y

seguridad comparables al HCFC-141b. Varios candidatos, incluyendo los isómeros de HFC-245, HFC-356 y HFC-365 están siendo evaluados, ninguno de estos HFCs se encuentra comercialmente disponible.

Pentano

Las tecnologías mejoradas con pentano se estan desarrollando para reducir la densidad de la espuma y para reducir el incremento en la conductividad térmica con fórmulas actuales.

CO_2(Inyección De Agua)

Se espera que esta tecnología sea mejorada a largo plazo y ampliamente aplicada para ciertos productos como las puertas.

OPCIONES DE RECUPERACIÓN/RECICLADO/DESTRUCCIÓN DE CFCs

Al igual que en la laminación flexible de paneles, no es técnicamente viable la recuperación y reciclado de todo el CFC-11 de las espumas. Después de separar la espuma de las superficies rígidas y generalmente no combustibles, el método más efectivo de destrucción del CFC-11 es el quemado de la espuma en un incinerador el cual debe ser capaz de convertir el valor calorífico de la espuma en energía.

SUSTITUCIÓN DEL PRODUCTO

Muchas de las consideraciones listadas para los laminados flexibles en paneles son igualmente aplicables para estos productos, sin embargo, la sustitución directa de la espuma de poliuretano en la aplicaciones es menos viable debido a que la espuma de poliuretano contribuye significativamente a las propiedades generales de los paneles de una forma tal que los productos fibrosos no pueden asemejar.

3.3.5 Espreado

A continuación se hará una descripción de las alternativas tecnológicas actualmente utilizadas para sustituir a los CFCs de los procesos de producción de espumas espreadas. Las alternativas se presentan en 2 grupos los cuales son:

- Opciones actuales.
- Opciones a largo plazo.

A continuación se detalla cada uno de ellos.

OPCIONES ACTUALES

Las opciones actuales se limitan al uso de HCFC 141b y CO2 inyectado. A continuación se hará una descripción de cada uno de ellos.

HCFC-141b

El HCFC-141b es una tecnología probada y en amplio uso. En la mayoría de los casos es combinada con pequeñas cantidades de agua para generar CO2. Los beneficios obtenidos con el CFC-11 se retienen y no se requieren modificaciones al equipo.

CO2 (Inyectado)

La inyección de CO2 al 100% es una tecnología probada pero no en amplio uso debido al incremento en la conductividad térmica de la espuma. Actualmente las propiedades mecánicas del espumado con 100% de CO2 son similares a aquellas con CFC-11. La conductividad térmica se incrementa en un 20-25% de su valor inicial a mas de 50% en su valor final. La densidad de la espuma debe ser incrementada por 20-30%.

OPCIONES A LARGO PLAZO

Un buen número de HFCs líquidos (a temperatura ambiente) se están estudiando como sustitutos potenciales a los HCFCs. Estos estudios están concentrados en encontrar las alternativas con las características de energía y seguridad comparables al HCFC-141b. Varios candidatos, incluyendo los isómeros de HFC-245, HFC-356 y HFC-365 están en proceso de evaluación, ninguno de estos HFCs se encuentra comercialmente disponible.

Los hidrocarburos no son una opción viable para el espreado debido a su alta flamabilidad, se espera que el desarrollo de tecnologías para espumas espreadas irá dirigida hacia el uso de CO2 o espumas base agua debido al costo proyectado para los HFCs.

3.3.6 Otras Aplicaciones

A continuación se hará una descripción de las alternativas tecnológicas actualmente utilizadas para sustituir a los CFCs de los procesos de producción de espumas para otras aplicaciones. Se incluye la descripción particular para las aplicaciones de elaboración de tubos espumados concéntricos y espumas unicomponentes. Las alternativas se presentan en 2 grupos los cuales son:

- Opciones técnicas actuales.
- Opciones a técnicas a largo plazo.

A continuación se detalla cada uno de ellos.

OPCIONES TÉCNICAS ACTUALES

Las opciones inmediatas y a largo plazo para estos productos son muy similares a las existentes para paneles de laminado flexible. Las opciones que se presentan son las siguientes: CFC-11 reducido, HCFC-141b y pentano.

CFC-11 Reducido

La reducción del CFC-11 en la espuma es viable y ha sido utilizado por una buena cantidad de empresas. Sin embargo la reacción altamente exotérmica es un problema critico en estas espumas y limita las reducciones que pueden lograrse.

Adicionalmente un aumento en la conductividad térmica de la espuma de hasta 10% puede ocurrir al utilizar fórmulas con CFC-11 reducido y sus características térmicas a largo plazo pueden ser afectadas negativamente.

HCFC-141b

El HCFC-141b es ampliamente utilizado en procesos continuos y discontinuos. La espuma resultante presenta características que son similares a las del CFC-11 que contienen menores propiedades térmicas. Los productores en Norteamérica han convertido totalmente su uso hacia el HCFC-141b.

Pentano

En Europa un porcentaje de la producción se ha convertido a n, iso o ciclopentano, especialmente en países o mercados en donde el HCFC-141b se considera como ambientalmente inaceptable. El ciclopentano es utilizado en casos en donde las características térmicas aislantes son especificadas por el gobierno debido a que este elemento proporciona la más alta capacidad aislante de los pentanos.

Se requieren tomar medidas de seguridad para la producción, el área de almacenamiento de la espuma y la fabricación debido a las características de flamabilidad del pentano.

Aun están en progreso investigaciones para desarrollar fórmulas que sean altamente resistentes a la combustión.

OPCIONES TÉCNICAS A LARGO PLAZO

Una gama de HFCs líquidos estan en la etapa de desarrollo para su comercialización. Estos incluyen isómeros de HFC 245, HFC 356 y HFC 365. Los aspectos que deben resolverse incluyen la toxicidad y los efectos potenciales en el medio ambiente, como el calentamiento global del planeta. Todas las evaluaciones se encuentran en una etapa temprana. En aquellas aplicaciones donde la espuma de células abiertas sea un producto aceptable las opciones de CO2 representan una opción adecuada.

A continuación se presenta una descripción de las principales alternativas para dos aplicaciones importantes en este rubro: tubos concéntricos y espumas unicomponentes.

Tubos concéntricos: Las principales alternativas de sustitución de CFCs actuales son el CO2 base agua, el HCFC 141b y el ciclopentano. A largo plazo se requiere un mayor desarrollo e inversión para que aumente la aceptación a nivel mundial de los pentanos. La tecnología de CO2 (agua) será viable cuando se logre desarrollar aun mas. No se tienen registrados antecedentes de desarrollo de HFCs para esta aplicación.

Espumas Unicomponentes: Las opciones técnicas actuales para sustituir a los CFCs de los procesos de producción de espumas unicomponentes son principalmente los HCFCs, butanos y el dimetil eter. A largo plazo las principales alternativas son los hidrocarburos en combinación con el dimetil eter (DME).

3.3.7 Conclusiones

Existe una gran variedad de opciones para desfasar a los CFCs en las espumas de poliuretano rígido. Muchas de estas, incluyen algunas opciones con cero PDO que ya han sido implantadas extensivamente en países desarrollados y están siendo implementadas en algunos países en vías de desarrollo. Los factores que deben ser considerados al seleccionar un agente espumante incluyen el consumo de energía, seguridad (en la empresa y en el cliente), emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), confiabilidad del producto, características estructurales del producto, costo, destrucción de ozono y calentamiento global. Es importante que la siguiente generación de agentes espumantes proporcionen el mejor desempeño posible, balanceando las características anteriores. Algunos de los agentes espumantes alternativos candidatos son los HFCs los cuales tienen mejores propiedades térmicas que el ciclopentano, no son flamables y no son COVs. Sin embargo, se requiere el suficiente tiempo para permitir que se desarrollen las pruebas pertinentes.

4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

Hasta este punto del estudio se ha desarrollado la etapa exploratoria de la metodología, que permitió la identificación de los procesos y tecnologías actualmente en uso en la Industria de Espumas de Poliuretano. La siguiente etapa a desarrollar es la de diseño del método de evaluación de alternativas tecnológicas lo cual representa el objetivo central del estudio. La metodología propuesta para dicha evaluación consta del desarrollo de las etapas siguientes:

1. Clasificación de alternativas tecnológicas de sustitución de CFCs y selección de aquellas a incluir en el estudio.
2. Identificación de los principales impactos asociados al uso de las alternativas tecnológicas en estudio.
3. Diseño del método de evaluación de alternativas tecnológicas.
4. Desarrollo del método de evaluación de alternativas tecnológicas.
5. Análisis de resultados

A continuación se desarrolla cada una de las etapas anteriores.

4.1 CLASIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SUSTITUCIÓN DE CFCs

Para clasificar las alternativas tecnológicas actualmente disponibles para la sustitución de CFCs en la industria del poliuretano se requiere el establecimiento de criterios de clasificación y selección de alternativas a incluir en el estudio. Los criterios a definir tendrán la función de agrupar a las alternativas tecnológicas en familias de acuerdo a sus principales características para permitir llevar a cabo

una evaluación desde un punto de vista más genérico. Para ello se desarrollan 3 etapas; la primera explora las principales características de las alternativas en estudio y sus tiempos de transición; en la segunda etapa se establecen los criterios de clasificación en base a la información de la primera etapa; la tercera etapa presenta a las alternativas seleccionadas divididas en dos secciones: espumas rígidas y flexibles. Es importante señalar que las alternativas seleccionadas se enfocan únicamente en aquellas alternativas que requieren cambio de agente espumante sin cambios de tecnología.

Los criterios de clasificación establecidos se presentan a continuación. Para su establecimiento se consideró importante el aspecto del tiempo de transición, ya que representa una limitante en el uso de ciertas alternativas. Otra limitante de importancia es el grado de alteración requerida en el proceso de producción para implantar a la nueva alternativa. Ambas cuestiones han sido consideradas para el establecimiento de los criterios que se analizan a continuación.

4.1.1 Tiempo de Transición

Se identifican dos grupos de tecnologías de acuerdo a este criterio: las de transición rápida y las de transición lenta. Las tecnologías de transición rápida tienen como objetivo primordial el desfasamiento de las Sustancias Destructoras de Ozono (SDO) en un solo paso con tecnologías con cero Potencial Destructor de Ozono (PDO). Las tecnologías de transición lenta se caracterizan por eliminar el uso de SDO de manera progresiva mediante el desarrollo de varias etapas. La transición rápida tiene como principal ventaja el ahorro de dinero y tiempo para la empresa, sin embargo la transición rápida no es posible en todos los casos ya que

en ciertos países se estimula el uso de tecnologías de transición lenta, principalmente por razones técnicas o económicas[7].

4.1.2 Características de la Alternativa

De acuerdo a las experiencias de desfasamiento evaluadas en este estudio, las vías de sustitución han sido principalmente en 3 formas: la sustitución del CFC por otra materia prima sin modificar el proceso, la sustitución con modificaciones al proceso, y la sustitución del CFC con cambios de tecnología. A continuación se hace una breve descripción de cada una de estas vías.

SUSTITUCIÓN SIN MODIFICACIÓN AL PROCESO

La sustitución sin modificación al proceso es posible cuando existen agentes espumantes alternativos con características muy semejantes a los CFCs, pero además con tiempos de vida en la atmósfera más cortos y consecuentemente un menor potencial para destruir ozono, o incluso no presentar potencial de destrucción de ozono. Los principales agentes espumantes alternativos con estas características son los HCFCs, HFCs (hidrofluorocarbonos) y gases inertes.

SUSTITUCIÓN CON MODIFICACIONES AL PROCESO

La sustitución con modificaciones al proceso se requiere cuando por razones de seguridad, calidad o escalamiento sea necesario acondicionar

equipos, o modificar los procesos operativos de producción. Los principales agentes alternativos espumantes identificados en este rubro son los pentanos.

SUSTITUCIÓN CON CAMBIOS DE TECNOLOGÍA

La sustitución con cambios de tecnología incorpora modificaciones al proceso y alternativas tecnológicas que incluyen nuevos sistemas químicos que permiten expandir la aplicación de espumas plásticas que requieran menores cantidades de CFCs. Por ejemplo, el aumentar el consumo de agua en la reacción química modifica el proceso de producción de las espumas de poliuretano. Cambios en los polioles y otros productos químicos usados en la etapa de espumado, también pueden reducir, y en algunos casos eliminar la necesidad de CFCs en los procesos de producción de espumas rígidas y flexibles de poliuretano. También se han diseñado equipos alternativos, los cuales reducen o eliminan la necesidad de utilizar agentes espumantes. De hecho, en espumas flexibles, equipos de presión variable simulan efectos de altitud que permiten manufacturar espumas de baja densidad sin agentes espumantes.

Es posible clasificar las alternativas aquí expuestas, a través de los criterios definidos, sobre lo que se abundará enseguida.

4.1.3 Criterios de Clasificación Propuestos

La clasificación de alternativas tecnológicas propuesta sigue los siguientes criterios:

1.- Clasificación de las alternativas tecnológicas en dos grupos: las dirigidas a la sustitución en el sector de espumas flexibles y las dirigidas a la sustitución en el sector de espumas rígidas.

2.-Identificación y agrupamiento de las alternativas de acuerdo al período de transición.

3.- Clasificación de las alternativas de acuerdo a los siguientes grupos: alternativas que no requieren modificación al proceso, alternativas con modificación al proceso y alternativas que requieren cambios de tecnología.

Aplicando los criterios anteriores, se obtiene una clasificación de alternativas que toma en cuenta los criterios más significativos y útiles para la estrategia de minimización de CFCs seleccionada. A continuación se presenta el resultado de la aplicación de estos criterios de clasificación.

4.1.4 Alternativas Seleccionadas

En esta sección se presentan las alternativas tecnológicas para espumas rígidas y espumas flexibles, seleccionadas con base en los criterios anteriormente citados.

ESPUMAS RÍGIDAS

Las alternativas tecnológicas seleccionadas de largo plazo son las siguientes: n-pentano, iso-pentano, CO2 inyectado, CO2 base agua, HFC245, HFC356, HFC365, poliéster, poliestireno.

Las alternativas tecnológicas de corto plazo o de transición son principalmente: HCFC141b, HCFC22, CFC-11 reducido.

Se propone agrupar a las alternativas tecnológicas de acuerdo a familias:

- Pentanos
- HCFCs
- CO2
- HFCs
- CFC reducido
- Productos sustitutos

El CO2 base agua es conocido también como tecnología MDI y tiene el mismo principio que el CO2 inyectado, la variante es la forma en la que se produce el CO2; debido a esto las dos alternativas pueden clasificarse dentro de un grupo. Por otro lado los HFCs no representan una alternativa en la actualidad ya que se encuentran en período de evaluación toxicológica, y no han sido comercializados a nivel industrial, se espera que esta alternativa se encuentre disponible en un período no mayor a 5 años, por lo tanto se excluye del estudio.

La siguiente opción el CFC reducido no representa una solución a la problemática de desfasamiento, ya que los niveles de sustitución posibles son menores al 20%, por lo que es una medida que actualmente no es recomendable. Por último el uso de productos sustitutos requiere de análisis que caen fuera de los objetivos de este trabajo, por lo que no será analizado.

Con estas premisas las alternativas de sustitución se reducen a 3 grupos:

1. Pentanos (n e isopentano)
2. HCFCs (141-b,22)
3. CO_2 (inyectado y base agua)

Los pentanos representan una alternativa de largo plazo que requiere modificación al proceso, mientras que los HCFCs no requieren modificación y son alternativas de corto plazo. El uso de CO_2 representa una alternativa que requiere cambios en tecnología en la mayoría de los casos y es una opción a largo plazo.

ESPUMAS FLEXIBLES

Las alternativas tecnológicas de largo plazo son principalmente: CO_2 inyectado, amplia gama de polioles, tecnologías alternativas.

Las alternativas tecnológicas de corto plazo o de transición son principalmente: cloruro de metileno, agentes ablandadores, metil cloroformo, acetona, tecnología AB, aumento de densidad, HCFC141b, pentano, tecnología MDI, tecnología E-Max, enfriamiento acelerado, presión variable.

En el sector de espumas flexibles las alternativas de transición a largo y corto plazo se clasifican dentro de 5 opciones las cuales son:

1. Conservación
2. Agentes espumantes alternativos
3. Modificaciones químicas
4. Tecnologías de manufactura alternativas
5. Sustitución del producto

La conservación no representa una alternativa atractiva debido a que no resuelve el problema ambiental. La sustitución del producto requiere de estudios adicionales que caen fuera del alcance de este trabajo, por lo que se excluirá del mismo. La clasificación se centrará en las siguientes opciones:

- Agentes espumantes alternativos (AEA)
- Modificaciones químicas (MQ)
- Tecnologías de manufactura alternativas (TMA)

Las opciones anteriores agrupan a varias alternativas; para el caso de los agentes espumantes alternativos son 5 las alternativas, 2 alternativas de modificaciones químicas y 4 tecnologías de manufactura alternativas. A continuación se presenta el análisis de cada una de las alternativas por cada opción de transición.

Agentes Espumantes Alternativos

Son 5 los principales agentes espumantes alternativos que se han usado en el sector de espumas flexibles, los cuales son:

1. Cloruro de metileno (CM)
2. Metil cloroformo (MCF)
3. Tecnología AB (AB)
4. Acetona (AC)
5. Tecnología CARDIO (CARDIO)

La Tecnología AB no permite el reemplazo total del CFC, por lo que tiene poca aceptación. En concreto, no representa una alternativa de sustitución por lo que se descarta del estudio. Similarmente el metilcloroformo es una sustancia

restringida por contener potencial destructor de ozono, por lo que también se descarta del estudio. De esta forma son 3 las alternativas reales a estudiar, y de éstas, el cloruro de metileno y la acetona presentan propiedades similares, a excepción de que la acetona tiene una mayor flamabilidad. Debido a esto se prefiere el uso de cloruro de metileno, lo cual se puede constatar en la literatura evaluada, en donde un gran número de empresas del sector de espumas flexibles que han elegido el uso de agentes espumantes alternativos, han seleccionado al cloruro de metileno como su opción de preferencia. Por último la tecnología CARDIO se encuentra en pleno desarrollo, no se conocen muchas empresas que hayan utilizado esta tecnología a nivel industrial, lo cierto es que representa una alternativa de bajo costo e impacto ambiental por lo que debe seguirse muy de cerca en los próximos años.

Modificaciones Químicas

El principal factor en contra de estas alternativas es que al utilizarlas no es posible obtener espumas de baja densidad con propiedades adecuadas. Actualmente las modificaciones químicas más utilizadas son:

1. Polioles de amplio rango
2. Tecnología MDI

Los polioles de amplio rango tienen un costo mayor al de los polioles convencionales, su principal desventaja es que no es posible la eliminación al 100% del CFC-11. Por otro lado la tecnología MDI conocida como "Water Blown" en donde el TDI se sustituye por agua tiene una gran aceptación ya que ofrece las siguientes características:

- No requiere la adición de AEA para ablandamiento
- Se obtienen bajas emisiones de isocianato
- Se obtiene un curado rápido
- Se obtiene un bajo grado de emisión de calor

Esta alternativa es prometedora y también representa una de las opciones más viables en el sector de espumas rígidas por lo que su evaluación y desarrollo se presenta en la sección del mismo nombre.

Tecnologías de Manufactura Alternativa

Son 4 las principales tecnologías de manufactura alternativas utilizadas actualmente:

1. Sistemas de presión variable (SPV)
2. Sistemas de enfriamiento acelerado (SEA)
3. Enviro-Cure (EC)
4. E-MAX

Se conoce que la tecnología E-MAX no es económicamente atractiva ya que requiere de altos costos de inversión, por lo que esta queda descartada del estudio. Por otro lado la tecnología Enviro-cure presenta un incremento en los costos operativos en comparación con el resto y con el uso de CFC, estas características no le favorecen, por lo que las tecnologías más utilizadas y por lo tanto más recomendables en esta categoría son los sistemas de presión variable y los sistemas de enfriamiento acelerado.

Alternativas Seleccionadas para Espumas Flexibles

A largo plazo el CO_2 es la alternativa mas promisoria, aunque requiere cambios de tecnología. A corto plazo el cloruro de metileno representa la opción de preferencia, y no requiere modificaciones al proceso. Otras tecnologías como los sistemas de presión variable y sistemas de enfriamiento acelerado representan alternativas prometedoras que requieren cambios de tecnología. Debido a que el estudio se enfoca en alternativas de sustitución de CFCs se descartan las tecnologías anteriores del mismo.

4.2 IMPACTOS ASOCIADOS AL USO DE LAS ALTERNATIVAS

Hasta este punto se han clasificado y seleccionado a las principales alternativas tecnológicas existentes; el siguiente punto importante a establecer es la forma mediante la cual se van a evaluar estas alternativas. Durante el desarrollo de esta etapa se tratará de responder a la pregunta: ¿qué indicadores se van a evaluar para establecer una relación comparativa entre las alternativas tecnológicas?. Para responder a esta pregunta es necesario tener un conocimiento preliminar de los impactos asociados al uso de cada una de las alternativas en estudio. La base para identificar estos impactos es la revisión bibliográfica. Partiendo de la revisión y estudio de experiencias de desfasamiento de las siguientes empresas danesas: Electrolux Frysebokse A/S, VESTFROST A/S, Tectrade A/S, Elcold Frysere Hobro, TARCO ENERGY A/S, Nassau Door A/S Baxenden Scandinavia A/S, Tinby A/S. Así como de 37 experiencias de desfasamiento de empresas de países desarrollados publicadas por el Ozone

Action Information Clearinghouse versión 5.0 de la UNEP, se obtuvo en primera instancia una lista preliminar de indicadores problemáticos asociados al uso de cada alternativa en particular. Esta lista preliminar se dividió en tres grandes grupos: indicadores operativos, ambientales y económicos, la lista se muestra a continuación.

Indicadores operativos

1. Densidad
2. Conductividad térmica
3. Pérdida de propiedades con la edad
4. Propiedades mecánicas
5. Velocidad de producción
6. Presión y Temperatura (a mayor, mayor consumo de energía)
7. Rango de espumas posibles
8. Consumo de Materia Prima
9. Riesgos de incendio y explosión
10. Requerimiento de otros agentes químicos
11. Tipo y cantidad de desecho
12. Cambios en los procedimientos de operación
13. Requerimientos de capacitación

Indicadores ambientales

1. Potencial de Calentamiento Global
2. Potencial Destructor de Ozono
3. Toxicidad de subproductos, emisiones e insumos

Indicadores económicos

1. Costo de Inversión
2. Costo de capacitación
3. Costo de mantenimiento y mano de obra
4. Consumo de energía
5. Costo de operación

Una de las principales características en común que presentan los indicadores anteriores es que de alguna forma todos inciden en un costo, por lo que se requirió de una reclasificación de estos, identificando en un grupo único aquellas características que tienen una relación directa con el desempeño final del producto, es decir con su calidad y asociando al impacto económico aquellos costos mayores de algunos de los indicadores operativos y ambientales, quedando las dimensiones de la evaluación clasificadas en tres áreas: impacto ambiental, impacto económico e impacto en el desempeño de la alternativa. A continuación se presenta una descripción de la problemática asociada a cada una de estas dimensiones.

4.2.1 Impacto Ambiental

Es difícil encontrar substitutos para los CFCs que reúnan todos los requerimientos técnicos de los agentes espumantes mientras mantienen un mínimo impacto en el medio ambiente. Debido a esta dificultad es necesario establecer medidas internas para contrarrestar el impacto. Los indicadores que se

consideran importantes en la evaluación del impacto ambiental de agentes espumantes son los siguientes:

- Potencial destructor de ozono
- Potencial de calentamiento global del planeta
- Toxicidad
- Flamabilidad

A continuación se discute cada uno de ellos.

POTENCIAL DESTRUCTOR DE OZONO

La clasificación de alternativas de acuerdo al periodo de transición obedece en gran medida al potencial destructor de ozono que algunos de los compuestos sustitutos poseen. La mayoría de las alternativas desarrolladas recientemente (principalmente el HCFC-22, HCFC-141b y HCFC 142-b) contienen cloro y tienen un potencial destructor de ozono y de calentamiento global del planeta, aunque este valor es significativamente menor al de CFCs. A pesar de su PDO, los HCFCs son considerados como sustitutos a corto plazo para poder implementar un reemplazo rápido de los compuestos CFCs. Se recomienda que el uso de HCFCs sea implementado únicamente cuando no existan otras alternativas apropiadas y se desarrollen e introduzcan alternativas a los CFCs tan pronto como fuera posible.

POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL

El potencial de calentamiento global del planeta de agentes espumantes sustitutos debe ser considerado cuidadosamente. Algunos productos alternativos, además de tener un efecto directo en el calentamiento global del planeta, pueden contribuir indirectamente al mismo, como ejemplo se tiene el espumado por medio de CO2 (base agua), en donde se obtiene un material con alta conductividad térmica, y por lo tanto un bajo valor aislante, este problema puede ser resuelto al incrementar el grosor de la espuma para incrementar la capacidad aislante. Si esto no es factible, el consumo de energía a través del ciclo de vida del producto será mayor, debido a un aislamiento poco efectivo, dando pie a un incremento en las emisiones de CO2 y una mayor contribución al calentamiento global del planeta. En general el potencial de calentamiento global del planeta representa un problema severo que en un futuro cercano pudiera ocasionar un desfasamiento de compuestos similar al causado por el potencial destructor de ozono identificado en CFCs.

TOXICIDAD

Alternativas razonables para la sustitución de agentes espumantes deben permitir una reducción global en el impacto ambiental y mejoramiento del ambiente laboral. Este último es por lo general difícil de lograr, considerando la naturaleza inerte de los CFCs. Sin embargo, es evidente que es primordial evitar riesgos innecesarios en la medida posible y administrar el riesgo apropiadamente cuando no pueda ser evitado. Para esto se hace uso del valor de exposición máxima

conocida en inglés como "Threshold limit value", el cual define los límites de exposición laboral aceptables en las empresas y son determinados de manera local o regional, para el caso de concentraciones superiores a este valor, se requiere el uso de equipo de protección o la instalación de equipos de prevención o control de las emisiones.

FLAMABILIDAD

Una de las ventajas técnicas de los CFCs es que no son flamables. Los HCFCs son parcialmente flamables pero debido a los riesgos de fuego o explosión que se asocian a su uso, se requieren cambios sustanciales en los procesos y la revisión de los procedimientos de emergencia y seguridad, así como la adquisición de equipo de protección y combate de incendios. Los hidrocarburos son compuestos altamente flamables (ejemplo: pentano y ciclopentano) por lo que su uso demanda extremas medidas de seguridad. Para lograr las mismas propiedades de flamabilidad del producto final se requiere el uso de retardantes de flama en concentraciones altas, lo cual da pie a otros problemas ambientales, entre ellos la formación de desechos con cierta toxicidad. La flamabilidad debe también ser considerada con respecto a los procesos de transporte, manejo y almacenamiento del producto, los cuales requieren una ventilación extensa.

4.2.2 Impacto en el Desempeño de la Alternativa

Los agentes espumantes deben ser compatibles con el precursor polimérico, ser químicamente inertes, poseer una buena solubilidad en la espuma

y para espumas aislantes deben poseer una baja velocidad de difusión en el polímero y poseer una baja conductividad térmica. El principal impacto de la alternativa en el desempeño del proceso se asocia a los siguientes factores:

- Conductividad térmica
- Propiedades mecánicas
- Pérdida de propiedades con la edad

A continuación se discute cada uno de ellos.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica representa la principal característica a mantener en el producto final, de ella depende la densidad y/o el grosor de aislamiento requerido en la espuma. Los valores de conductividad térmica afectan tres características esenciales en las espumas: capacidad aislante, tamaño requerido del producto y eficiencia energética.

PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas representan la segunda característica fundamental a mantener con la sustitución de agente espumante. Entre las propiedades mecánicas más importantes de las espumas se encuentra la fuerza de doblado, fuerza de tensión, elongación, ruptura y resistencia al impacto. El indicador para medir esta serie de propiedades es el grado de dureza o ablandamiento de la espuma.

PÉRDIDA DE PROPIEDADES DE LA ESPUMA CON LA EDAD

Como tercer criterio se encuentra la procastinación de la espuma, o dicho de otra forma las pérdidas de propiedades con la edad. El principal efecto adverso es el incremento en la conductividad térmica, en donde la velocidad de difusión de las diferentes alternativas varía considerablemente desde días en el caso del CO2 hasta cientos de años para algunos CFCs, HCFCs e hidrocarburos,

4.2.3 Impacto en el Costo

Se identifican dos componentes importantes en el impacto económico que una sustitución asocia, los cuales son los costos de inversión y los costos de operación. El costo de inversión total de una sustitución se compone de los siguientes rubros dependiendo de la alternativa:

- Maquinaria y equipo
- Patentes y licencias
- Transporte
- Disposición del equipo
- Instalación
- Capacitación y asistencia técnica

De la misma forma los costos operativos incrementales se componen de los siguientes rubros:

- Mantenimiento
- Consumo de materia prima

- Pérdida de rendimiento
- Materia Prima
- Tratamiento de desechos

Para la determinación del costo total de inversión se hace uso de la Ecuación 4.1.

$$CI = VE + PD + T + DF + C + I \quad \textbf{(4.1)}$$

Donde:

CI = Costo de Inversión

VE= Valor del equipo

PD= Patentes, diseños y licencias

T= Transporte

DF= Disposición final del equipo

C= Capacitación

I = Instalación

El costo operativo incremental se calcula a partir de la Ecuación 4.2.

$$COI = CPM + CCE + CPR + CMP + CTD \quad \textbf{(4.2)}$$

Donde:

COI = Costo operativo incremental (USD/Kg de espuma producida)

CPM Costo de Mantenimiento (se abrevia de esta forma para diferenciar de la abreviatura del cloruro de metileno CM)

CCE Costo por consumo de energía

CPR Costo por pérdida de rendimiento

CMP Costo de materias primas

CTD Costo por tratamiento de desechos

De acuerdo a las experiencias de desfasamiento revisadas en la bibliografía consultada se aprecia que los componentes de las Fórmulas 4.1 y 4.2 varían de acuerdo a la alternativa evaluada. La Tabla 4.1 muestra para las principales alternativas en estudio las ecuaciones modificadas.

Tabla 4.1 Cálculo del costo de inversión y operación para las principales alternativas en estudio

Alternativa	Inversión	Operación
Pentano	VE*+I	CPM+CCE+CPR+CMP+CTD
HCFC	C+VE**	CPM+CCE+CMP
CO2	C+VE	CMP+CCE

*Paquete tecnológico que incluye los rubros T,DF y C.
**Aplica sólo en algunos procesos y se refiere al costo del material plástico sustituto.

A continuación se discute la situación que presenta cada una de las alternativas en estudio, en referencia a los costos de inversión y operación requeridos.

COSTO DE INVERSIÓN

Para el caso del HCFC 141b el costo total de inversión se asocia a la necesidad de hacer un cambio en el material plástico de la superficie de moldes y equipo en general que entra en contacto con el HCFC, ya que éste ataca la superficie de la mayoría de los plásticos comerciales. El costo del cambio de material debe ser proporcional a la superficie requerida a transformar. El cálculo para conocer el costo final de inversión se presenta en la ecuación 4.3:

$$CI = VE + I \quad (4.3)$$

Es importante señalar que el término de VE se refiere al costo del material plástico sustituto, esta inversión solamente es necesaria para el caso del HCFC 141b. Para el caso de mezclas de HCFCs o el uso en estado puro de otro HCFC, el costo de inversión es nulo.

La inversión requerida para la aplicación de pentano como agente espumante oscila entre los 120,000 USD a más de 1´000,000 USD. La discrepancia se debe principalmente al volumen de producción, especificaciones del equipo, etc. Tomando como referencia empresas que consumen de 20 a 40 toneladas de SDO como agente espumante se estima que el costo sea de aproximadamente 150,000 USD. Se estima que aquellas empresas con volúmenes de producción mayores ya han hecho el cambio, por lo que la aplicación de esta metodología estará dirigida a pequeñas y medianas empresas cuyos requerimientos en materia de maquinaria y equipo sea aproximadamente en el orden de los 120,000 - 150,000 USD. El paquete tecnológico que se obtiene por este precio cubre básicamente los costos totales de inversión, por lo que es recomendable cotizar con varias empresas hasta obtener el precio más adecuado.

El costo total de inversión para utilizar tecnología de CO2 oscila entre los 50,000 y 100,000 dólares. Algunas variantes existen con empresas que producen agentes espumantes que no requieren modificaciones mayores al equipo, sin embargo, el costo asociado al uso de estos agentes espumantes es aproximadamente un 30% mayor al costo del CFC, así también existen serias limitaciones en su uso, ya que sólo aplican para la elaboración de espumas de altas densidades con propiedades aislantes muy pobres. En términos generales el

paquete tecnológico que ofrecen la mayoría de las empresas incluye el equipo, transporte, asistencia técnica, entrenamiento del personal e instalación.

El cloruro de metileno representa la tecnología con menores requerimientos de inversión. La mayor parte de la inversión se asocia al equipo requerido para recolección de emisiones al aire, aunque la mayoría de las empresas opta por no utilizarlo, principalmente debido a la tolerancia que existe actualmente para las emisiones de compuestos orgánicos volátiles; en particular en México aun no están regulados.

COSTO OPERATIVO

El costo operativo incremental se conforma principalmente de los componentes presentados en la Ecuación 4.2. A continuación se presenta una descripción de cada uno de ellos.

Mantenimiento

Los costos de mantenimiento deben basarse en el equipo adicional instalado elegible. En términos generales, el Fondo Multilateral establece en términos de financiamiento para este concepto lo equivalente a un 5% del costo de inversión incremental elegible del equipo.

Es importante señalar que con la sustitución la empresa incurre en gastos adicionales en este rubro. Un ejemplo es el costo por mantenimiento asociado al uso de HCFC 141b, en donde se requiere el uso de extintores y equipo de

seguridad. De la misma forma el costo por mantenimiento asociado al uso de pentano tiene como principales componentes los siguientes rubros:

- Adición de aditivos especiales a las bombas de alta presión
- Mantenimiento de una atmósfera de nitrógeno en la zona de dosificado
- Mantenimiento del nuevo sistema de alarmas

A su vez la adición de aditivos tiene como componente el precio del aditivo (USD/litro) y el rendimiento del mismo (litro/kg. de espuma producida). Estos datos pueden obtenerse del proveedor. El costo por mantenimiento de la atmósfera de nitrógeno tiene como principales componentes el gasto de energía requerido para la recirculación del nitrógeno y el costo del nitrógeno requerido. El nuevo sistema de alarmas requiere de un consumo de energía y un "stock" de refacciones permanente.

Para el caso del CO2 y el cloruro de metileno, los costos incrementales asociados al mantenimiento no se ven afectados de manera significativa.

Consumo de Energía

En ciertas experiencias de desfasamiento, la tecnología sustituta ha resultado en un incremento en el consumo de energía. Sin embargo, si este incremento genera en consecuencia una expansión en la capacidad de producción de la espuma (ya sea intencional o no intencional), se obtiene un beneficio que se puede considerar equivalente al costo adicional por lo que no debe considerarse en el cálculo del costo operativo incremental. El cálculo del costo de energía incremental debe basarse en los KiloWatts requeridos multiplicados por las horas de corrida anual y precio unitario local.

El costo por consumo de energía asociado al uso de HCFC 141b se debe principalmente a los requerimientos de temperaturas de operación más elevadas que los procesos originales. Un caso particular lo representa el uso de pentanos, los cuales en general requieren un consumo de energía adicional asociado al mantenimiento de la atmósfera de nitrógeno durante el dosificado. En el caso del CO2 el consumo de energía se incrementa debido a la utilización de una mayor presión y temperatura de operación. En términos generales se ha identificado que los costos asociados al consumo de energía para producir espuma con CO2 son aproximadamente 12% mayores que los costos con CFC. El cloruro de metileno no incorpora costos incrementales significativos en este rubro.

Pérdida de Rendimiento

Se ha observado que en ciertas aplicaciones como el uso de HCFC y cloruro de metileno, se tienen pérdidas en el rendimiento del proceso. En ciertos casos esta circunstancia representa una limitante muy importante para la empresa, sin embargo, en la mayoría de los casos, la pérdida de rendimiento se ve beneficiada con menores consumos de energía. El caso más crítico se presenta en el uso de HCFCs, en donde este rubro ha representado una proporción significativa en el costo operativo incremental de algunas empresas.

Materias Primas

El principal impacto económico en este rubro es el costo del agente espumante. En la sección 4.3. se detallan los costos estimados de los diferentes

agentes espumantes en diferentes periodos de tiempo. Sin embargo, algunas alternativas requieren también modificaciones en la formulación, en ocasiones incorporando compuestos químicos que no existían en la fórmula original. De esta forma, el costo incremental asociado se deriva de la diferencia entre los costos de la formulación original y actual. En el caso de los pentanos se tiene un incremento en el consumo de materias primas debido a la pérdida de propiedades funcionales como la densidad y la conductividad térmica; este problema se presenta similarmente en el uso de HCFCs, en los que se ha observado incrementos en la conductividad térmica en el orden del 5 %. Esto se puede asociar con 5% de incremento en el uso de HCFC. El caso particular de la tecnología base agua (CO2) asocia incrementos en los costos debido a mayores requerimientos de dosificado, este incremento se ve equilibrado debido a que se elimina el uso de agentes espumantes en esta tecnología. Para finalizar, el costo del cloruro de metileno es el que presenta el costo más bajo de los agentes espumantes en estudio. En 1995 los precios del cloruro de metileno para grado uretánico y grado no uretánico no excedieron 1.00 USD y 0.80 USD respectivamente. Sin embargo con su uso se presenta un incremento aproximado del 10% en catalizador amina y para casos en donde se requiera el enfriamiento forzado de la espuma o se utilizan tecnologías de ablandamiento, debe considerarse el incremento en el uso de TDI y la disminución en el uso de Cloruro de metileno en el cálculo de los costos operativos incrementales.

Tratamiento de Desechos

El tratamiento de desechos es necesario cuando se utilizan o generan compuestos tóxicos en los procesos de producción de espumas. En este sentido se puede considerar a la tecnología CO2 base agua como la más limpia de las alternativas en estudio. Los pentanos asocian cierta toxicidad a los procesos ya que requieren la adición de agentes retardantes de flama a las formulaciones, de esta forma se obtienen grandes volúmenes de desecho de este compuesto. Por otro lado la alternativa más problemática en cuestión de generación de desechos tóxicos es el cloruro de metileno. El principal desecho generado es volátil, y es específicamente la emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles, en este sentido el costo asociado se deriva de la compra del equipo de recolección y del equipo de protección que los trabajadores deban utilizar; sin embargo, si existe la suficiente ventilación y no se sobrepasa el valor de 12 PPM en el ambiente laboral no se requiere esta inversión. Es importante señalar que aunque no se exceda el límite anterior, el daño en la atmósfera es irreversible, ya que estos compuestos son precursores del smog fotoquímico.

4.3 MÉTODO DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

En esta sección se presenta el diseño del método de evaluación de los impactos asociados al uso de las alternativas tecnológicas en estudio. Éste se basa en gran medida en los métodos utilizados comúnmente en la evaluación del impacto ambiental que se encuentra comúnmente en la bibliografía[22]. El método consiste en evaluar cada una de las alternativas de manera comparativa de

acuerdo a su impacto en cada uno de los rubros presentados en la sección anterior. Para desarrollar la evaluación se identifican las etapas secuenciales siguientes:

1. Asignación de criterios de evaluación
2. Asignación de la ponderación de los impactos ambientales, económicos y de desempeño (en porcentaje).
3. Evaluación de los indicadores ambientales
4. Jerarquización de los indicadores ambientales
5. Evaluación de los indicadores de desempeño.
6. Jerarquización de los indicadores de desempeño.
7. Evaluación de los indicadores económicos.
8. Jerarquización de los indicadores económicos.
9. Evaluación matricial (utilizando la ponderación del punto 2) y selección de la alternativa en base a la mejor calificación.
10. Análisis del efecto combinado de las ponderaciones.

A continuación se detalla el desarrollo de cada uno de estos puntos.

4.3.1 Asignación de Criterios de Evaluación

Para hacer la evaluación comparativa entre dos alternativas se asignan valores numéricos al resultado de la comparación. Los criterios utilizados representan una modificación a las escalas utilizadas en bibliografía sobre Evaluación del Impacto Ambiental [22], la modificación consiste en reemplazar la escala discreta por continua, siendo los valores de referencia los siguientes:

10 La alternativa es considerablemente mejor

5 La alternativa es relativamente mejor

1 La alternativa es igual

1/5 La alternativa es relativamente peor

1/10 La alternativa es considerablemente peor

El rango es de 0.1 a 10, a mayor puntaje la alternativa es más recomendable, mientras menor sea el puntaje la alternativa es menos atractiva.

4.3.2 Asignación de la Ponderación a cada Criterio

El usuario debe establecer a manera porcentual la importancia que cada una de las 3 dimensiones tendrá en la toma de decisiones. Los indicadores económicos representan en la mayoría de los casos el principal móvil en los esfuerzos de transición, la calidad del producto por lo general se encuentra en segundo término, mientras que los indicadores ambientales representan la menor proporción de estos tres. Una ponderación típica, de acuerdo a las entrevistas personales sostenidas con empresarios de la localidad oscila entre un 70-80 % para el indicador económico, 20-30 % para el indicador de calidad y de 5-15% para el indicador ambiental. La empresa debe sin embargo establecer sus prioridades con cautela, siendo en gran medida esta etapa la más determinante en los resultados y por lo tanto la más importante en el proceso de evaluación.

Esta etapa es crítica en el desarrollo de la metodología, ya que afecta directamente el resultado final de la evaluación, como se presentará en la sección 4.10 mediante una representación de los efectos combinados de las ponderaciones por medio de un diagrama triangular.

4.3.3 Evaluación de los Indicadores Ambientales

Son dos etapas las que se requieren para cumplir con el propósito de evaluación de los indicadores ambientales. La primera consiste en definir las características particulares de cada alternativa respecto a cada uno de los siguientes indicadores: flamabilidad, toxicidad, Potencial de Calentamiento Global y Potencial Destructor de Ozono. La Tabla 4.2 suministra los valores para la evaluación comparativa de las alternativas en base a cada indicador, los cuales son traducidos a criterios fijos de evaluación. La etapa siguiente consiste en la construcción de Tablas con asignación de criterios fijos de evaluación de cada uno de los 4 indicadores ambientales involucrados. Los criterios fijos se obtienen al evaluar comparativamente y de manera matricial cada una de las alternativas tecnológicas en estudio. Los resultados representan criterios fijos a los cuales se les deben establecer las condiciones estándar de cada aplicación de acuerdo a las características de la empresa usuaria. Esto se hace mediante la asignación de diferentes ponderaciones a cada uno de estos indicadores, los cuales sumados deben totalizar un 100%. Para desarrollar la presente metodología se fijan ponderaciones equivalentes para cada uno de los indicadores ambientales, de manera análoga se ponderan los indicadores de desempeño. Los resultados, son representativos de las condiciones iniciales fijadas, es decir, de las ponderaciones asignadas a cada indicador. Los resultados son representativos y bajo ninguna circunstancia son ambiguos. El usuario debe considerar esta aseveración al momento de utilizar la metodología, en donde en base a información pertinente del sector debe ponderar a cada indicador de acuerdo a su importancia real dentro de la toma de decisiones para cada caso particular.

Tabla 4.2 Propiedades ambientales de los agentes espumantes seleccionados

	CFC 11	CFC 12	HCFC 22	HCFC 142b	HCFC 141b	CM	Iso pentano	Ciclo Pentano	n-pentano	CO2
Fórmula	CFCl3	CCl2F2	CH ClF2	CH3 CClF2	CH3 CCl2F	CH3 Cl2	C5H12	(CH2)5	C5H12	CO2
Límites de flamabilidad en el aire % vol	No	No	No	6.7-14.9	7.3-16	No	1.4-7.8	1.4-8	1.3-8	No
TLV* (PPM)	1000	1000	1000	1000	500	35-100	1000	600	600	N/A
PCG (100 años)	4000	7100	1700	2000	630	N/A	<50	<50	<50	1
PDO	1.0	1.0	0.055	0.065	.11	0	0	0	0	0

Fuente: OAICdv-5.0, UNEP 1996
*TLV-Treshold Limit Value

El tercer renglón representa el indicador de flamabilidad, el cual se incorpora dentro de los indicadores ambientales por representar un riesgo a la salud humana al igual que al medio ambiente. Está expresado como el límite de flamabilidad en porcentaje base volumen, el mayor valor es óptimo y representa un menor riesgo de flamabilidad o bien el no presentar riesgo de flamabilidad representa la situación óptima. Aplicando los criterios de evaluación propuestos con anterioridad se hace una evaluación comparativa entre las alternativas, la cual se presenta en la Tabla 4.3 para el indicador de Flamabilidad. En esta tabla se evalúa por cada renglón una alternativa en comparación con las demás. Por ejemplo, para evaluar a los CFCs en términos de flamabilidad (segundo renglón), se asignan valores mayores o iguales a 1, debido a que representan una mejor alternativa por no ser compuestos flamables. Al compararlos con el cloruro de metileno y el CO2 se asigna el valor de 1 ya que ambos compuestos no son flamables. Por otro lado, al compararlos con los HCFCs y pentanos obtienen mejores calificaciones ya que estos últimos poseen límites de flamabilidad, sobre todo al compararlos con los pentanos que poseen los límites de flamabilidad más

bajos. De esta forma se llena la Tabla 4.3, los resultados de la evaluación se presentan en la última columna, en donde se aprecia que las mejores alternativas son los CFCs, el cloruro de metileno y el CO2 ya que ninguno de estos compuestos son flamables.

Tabla 4.3 Evaluación para el indicador Flamabilidad

	CFCs	HCFCs	CM	Pentanos	CO2	Suma
CFCs		5	1	10	1	17
HCFCs	1/5		1/5	5	1/5	5.6
CM	1	5		10	1	17
Pentanos	1/10	1/5	1/10		1/10	0.5
CO2	1	5	1	10		17

De manera análoga se evalúa el indicador de Potencial Destructor de Ozono. En este indicador el menor valor de PDO en la Tabla 4.2 es el óptimo. Los resultados se muestran en la Tabla 4.4 en donde las mejores alternativas son el cloruro de metileno, los pentanos y el CO2 ya que ninguna de estas alternativas presentan un Potencial Destructor de Ozono.

Tabla 4.4 Evaluación para el indicador Potencial Destructor de Ozono

	CFCs	HCFCs	CM	Pentanos	CO2	Suma
CFCs		1/5	1/10	1/10	1/10	0.5
HCFCs	5		1/5	1/5	1/5	5.6
CM	10	5		1	1	17
Pentanos	10	5	1		1	17
CO2	10	5	1	1		17

El Potencial de Calentamiento Global (PCG) del planeta es otro indicador a evaluar, en donde el menor valor de PCG de la Tabla 4.2 representa la mejor opción. La mejor opción la representan el cloruro de metileno y el CO2 ya que el cloruro de metileno no posee un Potencial de Calentamiento Global, y el CO2 posee un valor tan bajo que se vuelve despreciable al compararlo con los valores del resto de las alternativas. Los resultados de la evaluación se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Evaluación para el indicador Potencial de Calentamiento Global

	CFCs	HCFCs	CM	Pentanos	CO2	Suma
CFCs		1/5	1/10	1/10	1/10	0.5
HCFCs	5		1/10	1/10	1/10	5.3
CM	10	10		5	1	26
Pentanos	10	10	1/5		1/5	20.4
CO2	10	10	1	5		26

El último indicador ambiental a analizar es la toxicidad. Se desea que el compuesto no tenga asignado un valor de TLV (Treshold Limit Value), o bien que el valor de TLV sea elevado. El TLV representa el valor máximo de exposición, o dicho de otra forma, la dosis de referencia en partes por millón (PPM) que establece la máxima concentración a la cual no existen efectos adversos a la salud, por la exposición al compuesto en cuestión. La mejor alternativa la representa el CO2 ya que no tiene un límite de concentración máxima, la cual genere riesgo a la salud humana. El compuesto más tóxico es el cloruro de metileno ya que presenta riesgos a la salud desde concentraciones de 35 PPM. Los resultados se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Evaluación de la toxicidad del compuesto

	CFCs	HCFCs	CM	Pentanos	CO2	Suma
CFCs		5	10	1	1/5	16.2
HCFCs	1/5		5	1/5	1/5	5.6
CM	1/10	1/5		1/10	1/10	0.5
Pentanos	1	5	10		1/5	16.2
CO2	5	5	10	5		25

De esta forma se han obtenido los indicadores para evaluar la dimensión ambiental de la metodología; los valores cuantitativos obtenidos para cada indicador representan criterios fijos a ser utilizados para la evaluación de la dimensión ambiental.

4.3.4 Jerarquización de los Indicadores Ambientales

Los resultados obtenidos hasta este punto son analizados utilizando un acomodo matricial. El usuario deberá incorporar una ponderación para los indicadores ambientales. Al asignar la ponderación se establecen las condiciones de operación de la metodología, que para referenciar los resultados se fija asignando valores equivalentes a cada uno de los indicadores como se muestra a continuación:

-Flamabilidad (25 %)

-PDO (25 %)

-PCG (25 %)

-Toxicidad (25 %)

Los resultados definitivos de la evaluación comparativa para los indicadores ambientales se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Análisis para la dimensión ambiental

	Flamabilidad		PDO		PCG		Toxicidad		
	Puntos	X .25	Puntos	X .25	Puntos	X .25	Puntos	X .25	Total
CFCs	17	4.25	0.5	0.125	0.5	0.125	16.2	4.05	8.55
HCFCs	5.6	1.4	5.6	1.4	5.3	1.325	5.6	1.4	5.525
CM	17	4.25	17	4.25	26	6.5	0.5	0.125	15.125
Pentanos	0.5	0.125	17	4.25	20.4	5.1	16.2	4.05	13.525
CO2	17	4.25	17	4.25	26	6.5	25	6.25	21.25

Los resultados de la evaluación del factor ambiental, demuestran para este caso, que el CO2 representa la mejor opción, el cloruro de metileno la siguiente opción, y posteriormente los pentanos, CFCs y HCFCs respectivamente. La ponderación asignada juega un papel importante. En algunas regiones las regulaciones sobre los Compuestos Orgánicos Volátiles (asociados al uso de cloruro de metileno), son muy estrictas; en este caso la ponderación para este indicador deber ser alta, y por lo tanto la jerarquización se vería modificada notablemente, es debido a esto que el usuario debe establecer los valores de ponderación con cautela.

4.3.5 Evaluación de los Indicadores de Desempeño

De manera análoga al procedimiento de evaluación de indicadores ambientales se procede a evaluar a los indicadores de desempeño de las alternativas tecnológicas. Se han establecido tres indicadores para medir dicho desempeño los cuales son: conductividad térmica, propiedades mecánicas y procastinación. La Tabla 4.8 presenta los datos a utilizar para la evaluación de los indicadores de conductividad térmica y procastinación. Estos datos están referenciados a valores de conductividad térmica a 10°C y de pérdida de propiedades con la edad presentadas en el transcurso de 120 días. La evaluación para las propiedades mecánicas se lleva a cabo mediante el uso de información cualitativa extraída de la bibliografía [9,10]. A continuación se lleva a cabo la descripción de cada uno de los indicadores propuestos.

Tabla 4.8 Propiedades de desempeño de los agentes espumantes seleccionados

	CFC 11	CFC 12	HCFC 22	HCFC 142b	HCFC 141b	CM	Iso Pentano	Ciclo Pentano	n-pentano	CO2
Fórmula	CFCl3	CCl2F2	CH ClF2	CH3 CClF2	CH3 CCl2F	CH3 Cl2	C5H12	(CH2)5	C5H12	CO2
Conductividad a 10°C mW/mK	7.4	10.5	9.9	8.4	8.8	7.5	13.0	11.0	14.0	14.5
Procastinación Incrementos de conductividad a los 120 días	6	N/D	N/D	N/D	6	6	N/D	5	N/D	10

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

En la evaluación del indicador conductividad térmica, la mejor opción la representa la menor conductividad térmica que proporcione el agente espumante al producto final; de esta forma se llena la Tabla 4.9, en donde la principal opción para este indicador la representan los CFCs (en particular el CFC 11), el cloruro de metileno en segundo término, y en tercero los HCFCs.

Tabla 4.9 Evaluación para el indicador conductividad térmica

	CFCs	HCFCs	CM	Pentanos	CO2	Suma
CFCs		5	1	10	7	23
HCFCs	1/5		1/5	5	7	12.4
CM	1	5		5	7	18
Pentanos	1/10	1/5	1/5		3	3.5
CO2	1/7	1/7	1/7	1/3		0.76

PROPIEDADES MECÁNICAS

De manera análoga se evalúa el indicador de propiedades mecánicas, en este indicador se evalúa el desempeño global de propiedades como viscosidad, tensión , dureza y/o ablandamiento. La información de la que se parte para la evaluación ha sido extraída de la bibliografía [9,10] y se presenta a continuación:

CFC-11 - Como agente espumante presenta la ventaja de poder reducir la viscosidad de la estructura de la espuma en etapas tempranas del proceso, para posteriormente tornarse menos soluble a medida que progresa la reacción de espumado. Esto asegura una buena estructura celular con un desempeño térmico óptimo.

HCFCs y pentanos - El problema con estas alternativas es principalmente que tienden a ser ya sea más o menos solubles que los CFCs, pero sin el cambio en las características de solubilidad durante el proceso, lo cual genera pérdidas sustanciales en las propiedades mecánicas en mención.

CO2 - El CO2 endurece a las espumas flexibles, mientras que en espumas rígidas causa el encogimiento del producto debido a pérdidas por difusión.

Cloruro de metileno - Para el caso del cloruro de metileno, las propiedades mecánicas se ven afectadas ligeramente con la edad, sin embargo en términos generales, a corto plazo éstas no son afectadas.

La mejor alternativa evaluada en este indicador la representan los CFCs y el cloruro de metileno. Los CFCs han demostrado presentar el mejor desempeño global de estas características; la información bibliográfica consultada sobre experiencias de desfasamiento [9,10] menciona acerca del buen desempeño que se obtiene al utilizar cloruro de metileno como sustituto de CFC 11, sin embargo,

debido a que su aplicación no se extiende a los procesos de elaboración de espumas rígidas, es necesario explorar otras alternativas para mejorar el desempeño global de estas propiedades. En particular el uso de pentanos y HCFCs presentan la problemática de una pobre solubilidad de los agentes espumantes en la mezcla durante la elaboración de las espumas, que en términos generales disminuye el rendimiento de las propiedades en mención. Los resultados de la evaluación se presentan en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Evaluación para el indicador propiedades mecánicas

	CFCs	HCFCs	CM	Pentanos	CO2	Suma
CFCs		5	1	5	10	21
HCFCs	1/5		1/5	1	5	6.4
CM	1	5		5	10	21
Pentanos	1/5	1	1/5		5	6.4
CO2	1/10	1/5	1/10	1/5		0.6

PROCASTINACIÓN

La procastinación de la espuma representa el tercer indicador de evaluación en esta dimensión, y se refiere a la pérdida de propiedades aislantes con la edad de la espuma. El menor valor de la Tabla 4.8 representa la mejor opción. Los datos presentados en dicha tabla representan el incremento en conductividad térmica promedio en una espuma con una conductividad térmica

original de 19 mW/mK, después de un período de 120 días[16]. Los resultados de la evaluación de este indicador se presentan en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Evaluación para el indicador procastinación

	CFCs	HCFCs	CM	Pentanos	CO2	Suma
CFCs		1	1	1/5	5	7.2
HCFCs	1		1	1/5	5	7.2
CM	1	1		1/5	5	7.2
Pentanos	5	5	5		5	20
CO2	1/5	1/5	1/5	1/5		0.8

Desde el punto de vista de procastinación, la mejor alternativa la representa la familia de los pentanos (esto tomando como referencia el valor para el ciclopentano, ya que es el único dato del que se dispone), ya que con su uso se obtienen menores pérdidas de conductividad en el período estudiado. Sin embargo el desempeño de CFCs (tomando como referencia el valor del CFC 11), HCFCs (tomando como referencia el valor del HCFC 141b) y el cloruro de metileno tienen valores muy similares, pero que en términos de competitividad significan mucho, ya que esto disminuye la calidad del producto. El peor desempeño en este indicador lo presenta el CO2.

De esta forma se han evaluado los indicadores de desempeño, la siguiente etapa consiste en jerarquizar dichos indicadores.

4.3.6 Jerarquización de los Indicadores de Desempeño

Los resultados obtenidos hasta este punto son analizados utilizando un acomodo matricial. El usuario de la metodología deberá incorporar una ponderación para los indicadores de desempeño. Dependiendo de la aplicación, algunos indicadores tendrán mayor prioridad que otros. Para referenciar el desarrollo metodológico se asigna una ponderación equitativa entre los indicadores, como se muestra a continuación:

-Conductividad térmica (33 %)

-Propiedades mecánicas (33 %)

-Procastinación (33 %)

Los resultados de la evaluación de los indicadores de desempeño se muestran en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Análisis para la dimensión de desempeño de la alternativa

	Conductividad		Props. Mecánicas		Procastinación		
	Puntos	X .33	Puntos	X .33	Puntos	X .33	Suma
CFCs	23.0	7.6	21.0	6.9	7.2	2.4	16.9
HCFCs	12.4	4.1	6.4	2.1	7.2	2.4	8.6
CM	18.0	5.9	21.0	6.9	7.2	2.4	15.2
Pentanos	3.5	1.2	6.4	2.1	20.0	6.6	9.9
CO2	0.8	0.3	0.6	0.2	0.8	0.3	0.7

Los resultados de la evaluación del factor de desempeño, demuestran que los CFCs representan la mejor opción, el cloruro de metileno la siguiente opción, y posteriormente los pentanos y HCFCs respectivamente, siendo la peor opción el CO2. Es necesario señalar que existe una variación entre el desempeño del ciclo e isopentano, similarmente entre el HCFC141b y el resto de los HCFCs y entre el CFC 11 y 12. Los valores utilizados son representativos del grupo y pueden variar al cambiar los valores de referencia utilizados, para este caso la referencia para cada grupo evaluado se describe a continuación:

CFCs→ CFC 11

HCFCs→ HCFC 141b

Pentanos→ciclopentano

Se ha tomado como referencia a las alternativas anteriores por ser las de mayor uso en los proceso estudiados. Sin embargo, el usuario debe reconocer las alternativas a evaluar de acuerdo a su proceso de producción. SI el valor de referencia no aplica para un determinado proceso de producción, la evaluación de estas alternativas debe hacerse con cautela desarrollando un proceso similar al presentado en este trabajo.

4.3.7 Evaluación de los Indicadores Económicos

La evaluación económica es la más importante y compleja de los indicadores en estudio. Son dos los componentes que se identifican para tal efecto: los costos de inversión y los de operación. A pesar de la gran cantidad de información bibliográfica consultada, no es posible determinar un costo de inversión representativo; éste depende en gran medida de las características del

proceso en donde se va a implantar el cambio y del volumen de producción de la planta. Otros factores importantes como la disponibilidad de tecnología, materias primas, asistencia técnica y el entorno regulatorio circunscriben en gran medida el costo total de la sustitución. A continuación se presenta una descripción del procedimiento para estimar los componentes de inversión y operación de la dimensión económica.

COSTO DE INVERSIÓN

Para la estimación de los costos de inversión se establece una clasificación de empresas de acuerdo al consumo de sustancias destructoras de ozono. Se propone una clasificación ABC en donde el límite entre A y B se establece en base a los criterios de financiamiento del Fondo Multilateral que fija el consumo mínimo anual de Sustancias Destructoras de Ozono (SDO) en 10 toneladas para otorgar financiamiento, las empresas que no califican (tipo A) se pueden interpretar como las empresas con un consumo de SDO anual menor a las 10 toneladas. Las empresas B y C tienen un consumo superior a las 10 toneladas anuales de SDO y se delimitan siendo las tipo B las que presentan un consumo superior a 10 toneladas y menor a 20 y las empresas tipo C las que presentan un consumo superior a las 20 toneladas anuales de SDO.

De acuerdo a la clasificación propuesta se estimaron los promedios de inversión por tipo de alternativa, los cuales se muestran en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Inversión promedio requerida por tipo de empresa

	HCFC 141b (USD)	Pentano (USD)	CO2-agua (USD)	Cloruro de Metileno
A	25 000	120 000	50 000	5,000
B	50 000	150 000	50 000	10,000
C	50 000	250 000 en adelante	100 000	15,000

Fuente: Revisión de experiencias de desfasamiento del OAIC-DV 5.0, UNEP

Nuevamente se aclara que los valores reales de sustitución pueden presentar variaciones considerables, es necesario que la empresa que desee aplicar esta metodología lleve a cabo una investigación preliminar de los costos de inversión que aplican en su caso.

COSTO OPERATIVO INCREMENTAL

Los costos operativos en una empresa se componen principalmente de una parte fija y otra variable. Así también las partidas identificadas en la Ecuación 4.2 se componen de una parte fija y otra variable. Identificar los costos incrementales asociados a la sustitución requiere de un conocimiento profundo de los costos operativos del proceso previo a la sustitución. Por lo general, esto requiere de un esfuerzo contable considerable que por lo general una empresa pequeña o mediana no desarrolla. Debido a lo anterior, se aplica un método alternativo diseñado para este estudio, en el cual se determina de manera global el incremento en los costos operativos con base en las experiencias consultadas en la bibliografía. Estos valores se determinan de manera porcentual, con la

desventaja que representan una situación particular en el tiempo, en donde se identifica como principal variable el costo de los agentes espumantes. Es por ello que se considera necesario identificar el comportamiento de los costos de los agentes espumantes en estudio de los últimos años y extrapolar estos valores en el tiempo. De esta forma, los incrementos porcentuales de los costos operativos obtenidos con este método pueden ser ajustados de acuerdo a los cambios en los costos de los agentes espumantes, partiendo de la base presentada en este estudio, la cual se desarrolla con datos de 1994. La Tabla 4.14 muestra una estimación del incremento porcentual que han tenido los precios de los cuatro principales agentes espumantes en estudio a partir de 1988, fecha en que dio inicio el desfasamiento.

Tabla 4.14 Prospectiva y tendencias en el costo incremental de agentes espumantes

	1988	1992	1996	1998	2000[5]	2010[5]
CFC[1]	25%	100%	120%	180%	n/d	n/d
HCFC[2]	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Pentano[3]	80%	80%	80%	80%	80%	80%
CO2-agua[4]	115%	115%	115%	115%	115%	115%
CM	80%	80%	80%	80%	80%	80%

[1]Fuente:HCFC Vs CFC, Greenpeace Report 1993
[2]Fuente: HCFC Vs CFC, Greenpeace Report 1993
[3]Fuente: Foam Sector Technologies Sourcebook 1994, OAIC DV 4.0
[4]Fuente:Foam Sector Technologies Sourcebook 1994, OAIC DV 4.0
[5]Estimaciones propias

El incremento está referenciado al valor del CFC-11 en 1988, dicho de otra forma la referencia representa la situación que se esperaría si no existiera el desfasamiento. En la Figura 4.1 se observa que el pentano se convirtió en una alternativa económicamente atractiva en términos del costo del agente espumante

a partir de 1991 y que el CO2-agua lo hizo a partir de 1995; así también se aprecia que el costo del HCFC se ha mantenido por debajo del CFC desde 1992.

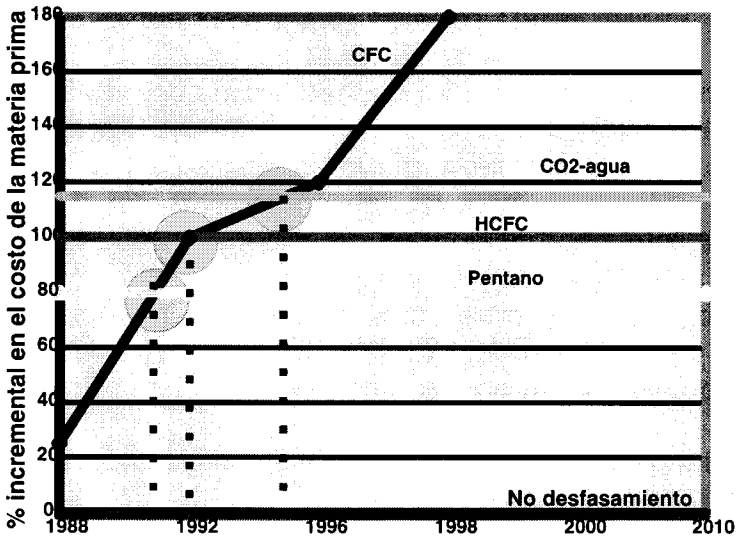


Figura 4.1 Costo incremental de agentes espumantes 1988-2010 tendencia y prospectiva

Estas cifras representan una estimación de acuerdo a datos del Banco Mundial y de diferentes fuentes en diferentes periodos. En el extremo final del periodo de desfasamiento se espera un incremento en el costo del HCFC similar al que se está experimentando actualmente para el CFC; por otro lado los hidrocarburos representan un recurso natural no renovable por lo que se esperaría que en algún punto del siglo siguiente exista una escasez de estos compuestos. Debido al incremento en el costo del HCFC y el pentano, la alternativa óptima sería el CO2- agua. De esta forma es posible establecer que a largo plazo la alternativa con menor impacto ambiental es la más económicamente atractiva.

Tomando como base la situación de 1994, son varios los indicadores considerados al proponer los valores de la Tabla 4.15. Primeramente se toma como referencia el costo operativo del CFC desfasado en 1994, debido a que la

bibliografía consultada para el seguimiento de empresas que utilizaron esta opción de desfasamiento es de esta fecha; así también 1994 representa la mitad del *período de desfasamiento (1988-2000)* para los *CFCs*. A partir de esta fecha se hará el análisis considerando como período de evaluación de 1994 al 2010.

Lo que la Tabla 4.15 indica es que por ejemplo al sustituir CFC por HCFC, se tendría un incremento de 15-20% en los costos operativos. El costo operativo del HCFC con relación al CFC sufre un ligero incremento adicional al costo como materia prima lo cual origina el incremento en los requerimientos de dosificación, ya que aumenta la conductividad térmica con el nuevo agente espumante. En particular no se considera necesario estudiar la variación que este incremento en costos pudiera tener de acuerdo al uso final del producto elaborado. De acuerdo a los sectores estudiados, las características requeridas en los productos son similares y ya se han discutido en la sección 4.2. La importancia que una u otra característica tenga se considerara equivalente para cada sector, tomando en cuenta que no se desea que el producto pierda calidad. El pentano tiene una variante importante ya que de ser una alternativa más barata de acuerdo al costo como materia prima, su costo con relación al CFC 11 en este periodo es ligeramente mayor. Este incremento se debe principalmente a los requerimientos de ventilación y al mayor consumo de energía que el proceso demanda. El CO2-agua por otro lado no tiene incrementos adicionales en los costos operativos. En el incremento del costo como materia prima se consideran los costos operativos en que se incurren, mismos que están asociados a mayores requerimientos de dosificación.

Tabla 4.15 Costos operativos incrementales con relación al CFC 11 desfasado en 1994

Alternativa	% costo incremental	Causa
CFC	Referencia	
HCFC	10-15 %	Mayores requerimientos de dosificado. Tratamiento de desechos Ciertos sistemas pierden rendimiento.
Pentano	10-15 %	Mayor consumo de energía. Mantenimiento del equipo.
Cloruro de metileno	1-5%	Capacitación y tratamiento de desechos
agua-CO2	6-10 %	Mayores requerimientos de dosificado.

La siguiente etapa a desarrollar en la evaluación económica es la jerarquización de los indicadores económicos la cual se presenta en la sección 4.3.8.

4.3.8 Jerarquización de los Indicadores Económicos

Para obtener el costo asociado al uso de las tecnologías sustitutas en estudio se hace uso de la información de las Tablas 4.13 y 4.15. En la Tabla 4.13 se proporciona una estimación de los costos de inversión asociados al uso de cada alternativa de acuerdo al consumo de Sustancias Destructoras de Ozono al año. El valor obtenido representa a la constante b de la Ecuación 4.4 y está expresada en miles de pesos, es importante señalar que los datos de la Tabla 4.13 se presentan en dólares, por lo que hay que hacer la conversión a miles de pesos. Los datos de la Tabla 4.15 representan el incremento en el costo operativo

pesos. Los datos de la Tabla 4.15 representan el incremento en el costo operativo por el uso de la nueva tecnología. Para incorporar este valor en la Ecuación 4.4 es necesario representarlo de manera fraccionada, es decir, si el porcentaje incremental es de 10%, entonces el valor de m de la Ecuación 4.4 es igual a 1.1; esto representa un incremento del 10% en el costo operativo por el uso de la nueva tecnología. Es importante señalar que para el caso de HCFCs se toma el valor de m igual a 1.1; para el caso del pentano m es igual a 1.15; para el CO2 m es igual a 1.05 y para el cloruro de metileno m es igual a 1.06. Estos valores son fijos y se establecen con base en que son los valores que más inciden en los casos estudiados en la bibliografía.[10,21,23] . La Ecuación 4.4 representa la ecuación de una línea recta, en donde m es la pendiente y b es la intersección.

$$Y = mX + b \qquad \textbf{(4.4)}$$

En donde:

Y= Costo de la nueva tecnología (miles $/año)

m= miles de $ de la nueva tecnología al año/ miles de $ de la tecnología actual al año (igual a 1+% asignado a la alternativa en la Tabla 4.15)

x= costo operativo actual (miles de $/año)

b= costo de inversión (miles $)

La Ecuación 4.4 se modifica para proyectar los resultados a un determinado tiempo, y de esta forma poder llevar a cabo un análisis costo beneficio. Para ello es necesario incorporar el término del Valor Presente Neto de la inversión. La Ecuación 4.5 representa el Valor Presente Neto de la inversión a

un tiempo n, con una tasa de retorno de inversión de i. N es establecido por el usuario y representa el período de tiempo máximo en el cual se desea recuperar la inversión. Al establecer n, se requiere evaluar la Ecuación 4.5 de manera discreta en el rango desde n=1 hasta n=n. Es decir, es necesario llevar á cabo una evaluación anual hasta el período establecido (n). Cuando el valor de n permite que el Valor Presente Neto de la inversión alcance el valor de cero, n representa el periodo de recuperación de la inversión.

La tasa anual de retorno se evalúa considerando el sector del mercado que no se pierde por concepto de la sustitución, para ello se utiliza el valor de las exportaciones anuales a países desarrollados como parámetro. Al dividir la inversión realizada entre este monto, se obtiene la tasa de retorno anual, que dicho de otra forma representa la proporción de la inversión original que se está recuperando anualmente.

$$VPN = b / (1+i)^n \qquad \textbf{(4.5)}$$

En donde:

VPN= Valor presente neto de la inversión (miles de pesos)

b=valor de la inversión a tiempo cero (miles de pesos)

i= tasa de descuento o retorno

n= número de años del período de evaluación

Utilizando las Ecuaciones 4.4 y 4.5 se conforma la Ecuación 4.6, la cual calcula el costo de la nueva tecnología a un determinado tiempo. Esta ecuación se

aplica para cada alternativa, resultando una ecuación representativa para HCFCs, otra para pentanos, CO2 y cloruro de metileno respectivamente.

$$Y = mX + b / (1+i)^n \qquad \textbf{(4.6)}$$

Los valores que el usuario introduce en la Ecuación 4.6 son el costo operativo actual (X) y el período deseado de recuperación de la inversión (n). b y m se obtienen de las Tablas 4.13 y 4.15 respectivamente , i se calcula dividiendo el monto de las exportaciones anuales entre la inversión. Si el usuario cuenta con una serie de datos de costos de operación, es posible establecer para cada situación el costo esperado con la nueva tecnología. La condición en el uso de esta fórmula es que los valores de b varían de acuerdo al consumo de SDO anual de la empresa. Por último, una vez que se cuenta con los resultados obtenidos de la aplicación de la Ecuación 4.6 para cada alternativa se procede a obtener la diferencia entre el costo de la nueva tecnología y el actual; la menor diferencia representa la situación óptima.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Ejemplificando la metodología anterior, se analizan los costos incrementales para un periodo de 2 años de una empresa con 70% de sus ventas a Estados Unidos y un promedio de ventas mensuales de $200,000. En donde el costo operativo anual propuesto es de 900 mil pesos, con un consumo de SDO de 15 toneladas/año.

Las exportaciones anuales de acuerdo a estos datos ascienden a $1,680,000. Aplicando la Ecuación 4.6 a los costos asociados al uso de HCFC141b, pentano, CO2 y cloruro de metileno se obtienen respectivamente los costos para el primer año. El valor de "i" se establece dividiendo el valor de las ventas anuales que corresponden a exportación entre el valor de la inversión. Los resultados se muestran a continuación:

Año 1

Y (CFC) =1.80 (900) = 1,620

Y (HCFC 141b) =1.10 (900) + (400/5.2)= 1,067

Y (pentano)=1.15 (900) + (1,200/2.4)=1,535

Y (CO2)=1.05 (900) + (400/5.2)= 1,021

Y (cloruro de metileno)=1.06 (900) + (80/22)= 957

Año 2

El valor de la inversión para el período de dos años se calcula sustituyendo el valor de n por 2 en la Ecuación 4.6. Los resultados se muestran a continuación:

Y (CFC) =1.80 (900) = 1,620

Y (HCFC 141b) =1.10 (900) + (400/27.04) = 1,005

Y (pentano)=1.15 (900) + (1,200/5.76) =1,243

Y (CO2)=1.05 (900) + (400/27.04)= 959

Y (cloruro de metileno)=1.06 (900) + (80/484) = 954

Al cabo de dos años los costos globales son los siguientes:

- CFC 11 → $3,240,000
- HCFC 141b → $2, 072,000
- Pentano→ $2, 778,000
- CO2→ $1,980,000
- Cloruro de metileno→1, 911,000

Los resultados anteriores proponen que la mejor alternativa en términos económicos es el cloruro de metileno, posteriormente el CO2, HCFCs y pentanos respectivamente, siendo la peor opción el uso de CFCs, esto debido a su alto incremento en su costo como materia prima debido a su escasez. Los resultados de la evaluación comparativa entre estas alternativas se presentan en la Tabla 4.16.

Es importante señalar que el incremento en el costo de CFCs se debe a que su disponibilidad ha disminuido considerablemente, esto acarrea que estos compuestos se conviertan en una alternativa de corto plazo, así pues es de esperar que esto afecte el costo de su transición.

Tabla 4.16 Jerarquización de los indicadores económicos

	CFCs	HCFCs	CM	Pentanos	CO2	Suma
CFCs		1/5	1/10	1/3	1/9	0.63
HCFCs	5		1/5	3	1/3	8.5
CM	10	3		9	2	24
Pentanos	3	1/3	1/9		1/5	3.6
CO2	9	3	1/2	8		20.5

Antes de proceder a jerarquizar las 3 dimensiones (ambiental, desempeño y económica) es importante conocer el período de recuperación de la inversión para cada alternativa. Esta se obtiene cuando el Valor Presente Neto de la inversión tiende a cero. Cuando las Ecuaciones 4.7 a 4.10 tienden a cero, el valor de n representa el período de recuperación, estas ecuaciones se conformaron mediante la aplicación de la Ecuación 4.5.

$$VPN_{HCFCs} = 400/5.2^{n} \quad \textbf{(4.7)}$$

$$VPN_{Pentanos} = 1{,}200/2.4^{n} \quad \textbf{(4.8)}$$

$$VPN_{CO2} = 400/5.2^{n} \quad \textbf{(4.9)}$$

$$VPN_{CM} = 80/22^{n} \quad \textbf{(4.10)}$$

Con la aplicación de las ecuaciones anteriores se obtiene para HCFCs, pentano y CO2 un periodo de recuperación de inversión aproximado de cinco años. Para el cloruro de metileno el periodo de recuperación de la inversión es de dos años. Esta información apoya la decisión respecto al mejor desempeño económico en donde la recuperación de la inversión se comporta de manera muy

semejante para las alternativas en estudio a excepción del cloruro de metileno que representa el menor periodo de recuperación de la inversión.

4.3.9 Evaluación de las 3 Dimensiones Ponderadas

La etapa final de la evaluación es la incorporación de las tres dimensiones estudiadas: ambiental, desempeño y económico. La parte crítica de esta etapa es la ponderación asignada a cada uno de estos impactos, lo cual debe ser un reflejo de los requerimientos de la empresa. La ponderación utilizada para este desarrollo es la siguiente:

-Ambiental (10 %)

-Desempeño (20%)

-Económica (70%)

La Tabla 4.17 muestra los resultados de la jerarquización, para las tres dimensiones evaluadas. Se observa que la mejor opción es utilizar cloruro de metileno; la siguiente opción el uso de CO2; en tercer lugar los HCFCs; en cuarto lugar el uso de pentanos y en último lugar el uso de CFCs.

Tabla 4.17 Jerarquización de las tres dimensiones ponderadas

	Ambiental		Desempeño		Económico		
	Puntos	X 0.1.	Puntos	X 0.2	Puntos	X 0.7	Suma
CFCs	8.55	0.85	16.9	3.38	0.63	0.44	4.67
HCFCs	5.525	0.55	8.6	1.72	8.5	5.95	8.22
CM	15.125	1.51	15.2	3.04	24	16.8	21.35
Pentanos	13.525	1.35	9.9	1.98	3.6	2.52	5.85
CO2	21.25	2.12	0.7	0.14	20.5	14.35	16.61

La ponderación asignada a cada dimensión representa una condición particular de la metodología; ésta puede variar y los resultados en consecuencia también. Es importante recalcar que existen estrategias alternativas de minimización de Sustancias Destructoras de Ozono. La que se ha seguido en este estudio es la sustitución, que suele ser la más común y recomendable para las empresas del sector en estudio, en particular en países en vías de desarrollo.[7]

4.3.10 Análisis del Efecto Combinado de las Ponderaciones

Hasta este punto se han obtenido los resultados de la metodología bajo las condiciones de operación fijadas de:

Ponderación Ambiental- 10%

Ponderación de Desempeño- 20%

Ponderación Económica-70%

Para conocer el comportamiento de la metodología en el universo de condiciones posibles, se analiza el efecto combinado de las diferentes ponderaciones que puede asumir cada una de las dimensiones en estudio. Esto se lleva a cabo haciendo uso de un diagrama triangular[24]. En la Figura 4.2 se representan para espumas rígidas las regiones en las cuales cada alternativa es más recomendable. Cada vértice del triángulo se toma como punto de referencia para un 100% de ponderación de cada dimensión y las flechas sobre cada lado del triángulo representan los ejes de cada dimensión. Por ejemplo, en la Figura 4.2 el punto donde las alternativas de CO2, pentano y HCFCs son igualmente recomendables es el que corresponde a una ponderación económica de 30%, ambiental de 30% y 40% de desempeño. Para el caso del CO2 se puede apreciar que esta alternativa representa la mejor opción en la mayor parte del rango de opciones disponibles; se puede decir que mientras el impacto ambiental tenga una ponderación mayor al 50% la mejor opción invariablemente será el CO2. A medida que el impacto ambiental tiene menor ponderación se presenta un abanico de alternativas a corto y largo plazo.

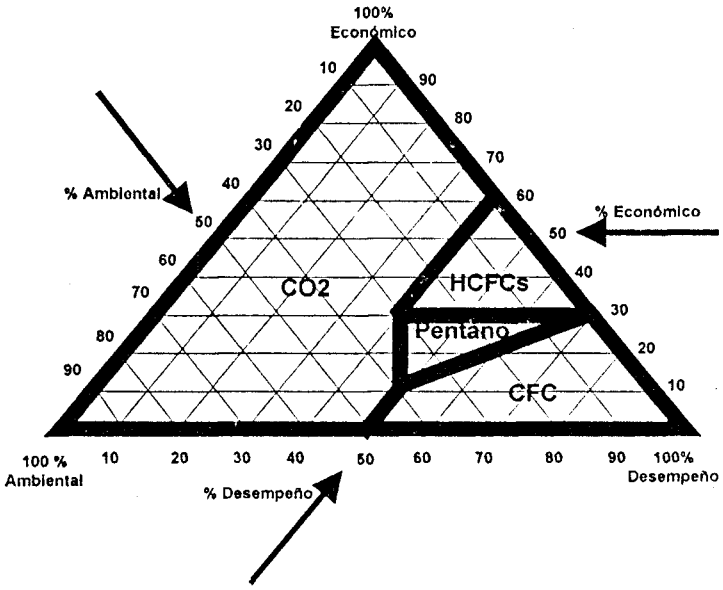


Figura 4.2 Representación Triangular: Espumas Rígidas

Una situación análoga se presenta en la Figura 4.3, en donde se presentan los resultados para el sector de espumas flexibles. El cloruro de metileno representa la mejor opción cuando la ponderación a los indicadores de desempeño se encuentra entre el 20% y el 60% de ponderación y representa la mejor alternativa en la mayor parte del área del triángulo. A bajas ponderaciones económicas (menores o iguales a 50%) y de desempeño (menores o iguales a 20%) el CO2 es la alternativa ideal, mientras que a bajas ponderaciones ambientales los CFCs son la alternativa idónea.

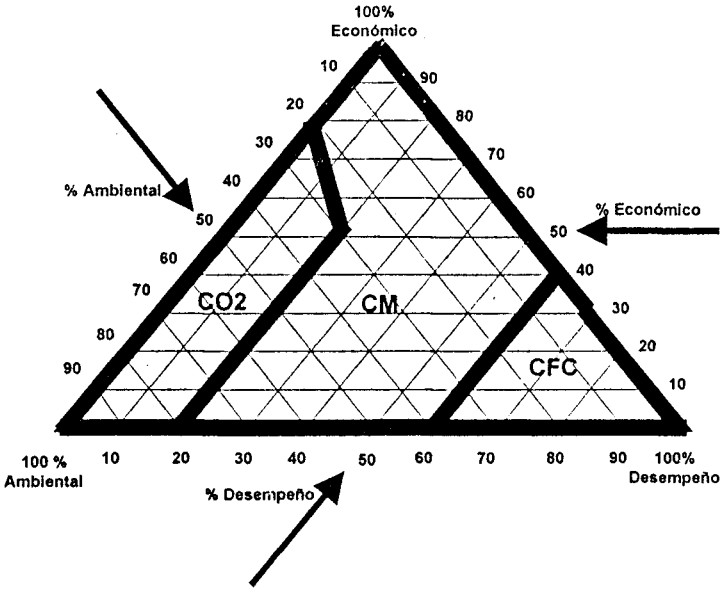


Figura 4.3 Representación Triangular: Espumas Flexibles

Las Figuras 4.2 y 4.3 permiten al usuario identificar el impacto que tiene la ponderación que se asigne a las tres dimensiones sobre los resultados de la evaluación. De esta forma es posible identificar a la alternativa ideal de acuerdo a los requerimientos particulares de cada empresa.

CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

- Se identificaron a las principales alternativas tecnológicas actualmente disponibles para la sustitución de CFCs en los procesos de producción de espumas de poliuretano y se clasificaron en grandes grupos los cuales son: CFCs, HCFCs, pentanos, CO2 y cloruro de metileno.
- Se identificaron las principales características de las alternativas anteriores y sus principales indicadores bajo tres dimensiones: ecológica, desempeño y económica.
- Se llevó a cabo una evaluación comparativa de las alternativas tecnológicas anteriores utilizando los indicadores como criterios fijos para identificar a la alternativa óptima.
- Las alternativas óptimas varían de acuerdo a las ponderaciones que se le asigne a cada dimensión en estudio. Se construyeron dos diagramas, uno para el sector de espumas rígidas y otro para el de espumas flexibles, los cuales identifican a la mejor alternativa de acuerdo a las ponderaciones asignadas.
- Las principales características de las alternativas tecnológicas disponibles para sustituir a los CFCs de los procesos de producción de espumas de poliuretano pueden ser clasificadas en tres dimensiones: ecológica, desempeño y ambiental. Con base en la identificación de los principales indicadores de cada dimensión es posible encontrar a la alternativa óptima para cada tipo de empresa, de acuerdo a la ponderación que se le asigne a cada una de estas dimensiones.

- La alternativa que presenta un mayor cumplimiento en las tres dimensiones en el sector de espumas rígidas es el CO2. Para el sector de espumas flexibles es el cloruro de metileno. Los CFCs representan la mejor alternativa en los niveles más bajos de ponderación económica y ambiental.
- Los diagramas de triángulo presentados en las Figuras 4.2 y 4.3 representan los resultados globales del estudio. Estos pueden ser utilizados para apoyar la selección de la alternativa óptima de acuerdo a los requerimientos de cada empresa y su entorno.
- Se recomienda aplicar la metodología propuesta en casos prácticos para validarla.

BIBLIOGRAFÍA

1. Molina M., Rowland F., Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atomic Catalyzed Destruction of Ozone, Nature, Vol 249, June 1974.
2. Stolarski R., The Antartic Ozone Hole, Scientific American, Volume 258, Number 1, January 1988
3. UNEP, Scientific Assesment of Ozone Depletion 1991: Stratospheric Ozone Depletion, Chapter 6, Evaluation of Ozone Depletion, UNEP Comitte of Scientific Assesment
4. UNEP,The Multilateral Fund for the Implementation of the Montreal Protocol: Information Kit, OzonAction Information Clearinghouse 4.0, June 1996
5. UNEP, Sectorial information: projects financed, OzonAction Information Clearinghouse 4.0, June 1996
6. .PNUMA, Eliminación bajo el Fondo Multilateral, Acción Ozono, No. 19, pag. 1, Julio de 1996
7. UNEP Technical Options Commitee, Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee 1995 Assessment,Chapter 1, 1995
8. UNEP, Implementation Agencies, OzonAction Information Clearinghouse 4.0, June 1996
9. UNEP, Sourcebook of Technologies for Protecting the Ozone Layer, Flexible and Rigid Foams, Sourcebooks series,1994.
10. UNEP, projects financed: case studies, OzonAction Information Clearinghouse 4.0, June 1996

11.UNEP Technical Options Commitee, Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee 1995 Assessment,Chapter 3, 1995

12.UNEP Technical Options Commitee, Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee 1995 Assessment,Board of Members, 1995.

13.Greenpeace, Technology update: HFCs, July 1994

14.AFEAS, Alternative fluorocarbons and stratospheric ozone, February 1991

15.UNEP, Foam Sector Technologies in use, IE, August, 1995

16.Greenpeace, Back to the Future: A Survey of Essential Information Regarding Hydrocarbons Vs. HCFC-141-b and HFC-134a in Domestic Refrigerators, Greenpeace Report, January 1995

17.Kruse H., Hydrocarbons Vs. HFC-134a, Greenpeace Report, January 1995

18. Lippincott, T., PU Consumption Exceeds four Billion lbs in 1994, Rubber World, 11-01-95, Vol 213, pp 16.

19.ITESM Campus Guadalajara, Jalisco 2000 de Frente a las Nuevas Realidades, Centro de Estudios Estratégicos, ITESM Campus Guadalajara, 1993.

20. PNUMA CAP/IMA, Proteger la Capa de Ozono, Volumen 4, Espumas, PNUMA, 1992

21.UNEP, Foams Sector Technologies in Use:Case Studies, UNEP Industry and Environment 1995

22.Environmental Impact Assesment, Larry W. Canter, Mc Graw Hill 1996

23.UNEP, Sectorial information: projects financed, OzonAction Information Clearinghouse 5.0, June 1997.

24. Fundamentos de Fisicoquímica, Maron y Pruton, Capítulo 10, pag 384, Editorial Limusa 1968 .