

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**“DISEÑO DE UNA PLANTA DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO
DE LOS EMPAQUES TIPO *BLISTER* USADOS POR LA INDUSTRIA
FARMACÉUTICA”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
QUÍMICA**

**CLARA ALEJANDRA ERAZO SORIA
(ale_erazosoria15@hotmail.com)**

**DIRECTORA: Ph.D. DIANA ENDARA DRANICHNIKOVA
(diana.endara@epn.edu.ec)**

Quito, julio 2015

© Escuela Politécnica Nacional 2015
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Clara Alejandra Erazo Soria, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Clara Alejandra Erazo Soria

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. Clara Alejandra Erazo Soria bajo mi supervisión.

Ing. Diana Endara Dranichnikova Ph.D.

DIRECTORA DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Morenita, por bendecirme con la familia que tengo, todo lo que alcance en mi vida es gracias a ellos.

A mi papi por enseñarme a ser correcta en la vida, a hacer las cosas bien, por cuidarme siempre y apoyarme en todo lo que me propongo. A mi mami por su amor incondicional, su perseverancia y por siempre tener las palabras de aliento que necesitamos. A mis hermanos Lucía y Pablo, por ser mi ejemplo a seguir, mis dos angelitos, gracias por ser mis compañeros de vida, por estar a mi lado en los buenos y malos momentos, por enseñarme que nunca hay que darse por vencido y estar dispuestos a darme una mano siempre que lo necesito.

Agradezco especialmente a Dianita Endara, por ser una excelente ingeniera pero sobretodo una persona excepcional, por estar dispuesta a ayudarme siempre y por sus acertados consejos en el desarrollo de este trabajo. Al Ingeniero Ernesto de la Torre por abrirme las puertas del DEMEX, por su apoyo y enseñanzas. Al Ingeniero Pedro Mantilla por ser parte de mi tribunal y aportar a mi trabajo.

A los amigos que la universidad me ha permitido conocer, especialmente a los “Malacopa” por todo lo que vivimos juntos, por demostrarme que puedo contar con ustedes cuando mas lo necesito. A mis amigas incondicionales Marie Yépez y Lucy Calle, son como unas hermanas para mi.

Gracias a la familia Demex, Sra. Verito, Pauli, Eve, Ing. Ely, Ing. Alice y a mis compañeros tesisistas. A Anilú por ser mi compañera durante este trabajo y por brindarme su amistad. A Kleverito por ayudarme en mis ensayos y darme los consejos que me permitieron seguir adelante. A Isaac por ayudarme siempre que lo necesite y corregir el formato de este trabajo.

A esas personas que la vida me ha dado la suerte de tener en mi camino: Cris, Dj y Jose, gracias por todo lo que han hecho por mi. No importa la distancia entre nosotros estoy segura que siempre estarán ahí para mi.

DEDICATORIA

Este trabajo esta dedicado a Pablo y Elizabeth, los mejores padres que pueden existir. A Lucía y Pablo, mis hermanos, padrinos y mejores amigos.

Les amo con todo mi corazón.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	xvii
INTRODUCCIÓN	xviii
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Reciclaje de aluminio	1
1.1.1 Principales problemas en la metalurgia secundaria del aluminio	4
1.1.2 Fusión de aluminio con sales de cloro y flúor	5
1.1.2.1 Diagramas de fase de los cloruros y fluoruros	5
1.1.2.2 Tensión interfacial entre el metal y la sal	7
1.1.2.3 Poder de coalescencia de la carga fundente	8
1.1.2.4 Efecto de la composición en el rendimiento del proceso	8
1.1.2.5 Interacción entre la capa de óxido de aluminio y las sales fundentes	9
1.1.2.6 Reciclaje de aluminio a partir de residuos industriales y electrónicos en presencia de sales	11
1.1.2.7 Escorias salinas generadas en el proceso de fusión	14
1.1.3 Equipos utilizados para la recuperación de aluminio mediante fusión	14
1.1.3.1 Horno rotatorio	15
1.1.3.2 Horno de reverbero	16
1.1.3.3 Horno eléctrico	17
1.1.3.4 Fusión por antorcha de plasma	17
1.1.3.5 Fusión en hornos de arco eléctrico	18
1.1.3.6 Fusión con control de los quemadores	19
1.2 Reciclaje de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	19
1.2.1 Empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	19
1.2.2 Componentes de los empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	20
1.2.2.1 Film formado	20
1.2.2.2 Material de cubierta	22
1.2.2.3 Recubrimiento de sellado térmico	23
1.2.2.4 Tintas de impresión	23
1.2.3 Proceso de elaboración de empaques tipo <i>blister</i>	24
1.2.4 Métodos de reciclaje de empaques tipo <i>blister</i>	25
1.2.4.1 Recuperación de PVC de materiales compuestos (Proceso Vinyloop)	25
1.2.4.2 Combustión en dos etapas del material con PVC con recuperación de HCl	27
1.2.5 Lixiviación de PVC con solventes orgánicos	28
1.2.5.1 Policloruro de vinilo (PVC)	28
1.2.5.2 Disolventes orgánicos	30
1.2.5.3 Criterios de solubilidad para polímeros	31

2. PARTE EXPERIMENTAL	35
2.1 Caracterización física, química y mineralógica de los empaques usados por la industria farmacéutica	37
2.1.1 Caracterización física de los empaques farmacéuticos	37
2.1.2 Caracterización química de los empaques farmacéuticos	37
2.1.2.1 Caracterización química de la lámina metálica de los empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	37
2.1.2.2 Caracterización química del material polimérico de los empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	37
2.1.3 Caracterización mineralógica de los empaques farmacéuticos	38
2.2 Definición de las mejores condiciones de lixiviación utilizando solventes orgánicos (acetona y acetato de n-butilo)	38
2.3 Definición de las mejores condiciones del proceso de fusión utilizando sales de cloro y flúor	41
2.3.1 Concentración de las sales dentro de la carga fundente	42
2.3.2 Evaluación del porcentaje de carga fundente necesario	43
2.3.3 Influencia de la variación de temperatura	43
2.3.4 Determinación del tiempo de fusión	44
2.3.5 Influencia de la adición de fluoruro de potasio (KF)	44
2.3.6 Caracterización química y mineralógica del aluminio obtenido	45
2.3.6.1 Caracterización química del aluminio obtenido	45
2.3.6.2 Caracterización mineralógica del aluminio obtenido	45
2.4 Definición del diagrama de flujo y selección de equipos necesarios para el procesamiento de 5 t de empaques farmacéuticos al mes	46
2.5 Estudio de prefactibilidad técnico-económica de una planta con capacidad de procesamiento de 5 t de empaques farmacéuticos al mes	46
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
3.1 Resultados de la caracterización física, química y mineralógica de los empaques utilizados por la industria farmacéutica	48
3.1.1 Resultados de la caracterización física de los empaques farmacéuticos	48
3.1.1.1 Resultados de humedad	48
3.1.1.2 Resultados del contenido de material volátil	49
3.1.1.3 Resultados del contenido de carbón fijo y cenizas	50
3.1.1.4 Resultados de la densidad real y aparente	51
3.1.2 Resultados de la caracterización química de los empaques farmacéuticos	52
3.1.2.1 Resultados de la caracterización química de la lámina metálica de los empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	52
3.1.2.2 Resultados de la caracterización química del material polimérico de los empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	52
3.1.3 resultados de la Caracterización mineralógica de los empaques farmacéuticos	56

3.2	Resultados de la definición de las mejores condiciones de lixiviación utilizando solventes orgánicos (acetona y acetato de n-butilo)	57
3.2.1	Resultados de los ensayos de lixivación de PVC con acetona 98 %	57
3.2.2	Resultados de los ensayos de lixiviación de PVC con acetona 50 %	60
3.2.3	Resultados de los ensayos de lixiviación de PVC con acetona 25 %	61
3.2.4	Resultados de los ensayos de lixivación de PVC con acetato de n-butilo 98 %	63
3.2.5	resultados de los ensayos de lixiviación de PVC con acetato de n-butilo 50 %	65
3.2.6	resultados de los ensayos de lixiviación de PVC con acetato de n-butilo 25 %	67
3.2.7	resultados de la definición de las condiciones de lixiviación	68
3.2.8	resultados de la caracterización química y mineralógica del aluminio obtenido por lixiviación	71
3.3	Resultados de la definición de las mejores condiciones del proceso de fusión utilizando sales de cloro y flúor	73
3.3.1	Resultados de la concentración de las sales dentro de la carga fundente	74
3.3.2	Resultados de la definición del porcentaje de carga fundente	78
3.3.3	Influencia de la variación de temperatura	80
3.3.4	Determinación del tiempo de fusión	82
3.3.5	Resultados de la influencia de la adición de fluoruro de potasio (KF)	85
3.3.6	Resultados de la caracterización química y mineralógico del aluminio obtenido	86
3.3.6.1	Caracterización química del aluminio obtenido	86
3.3.6.2	Resultados de la caracterización mineralógica del aluminio obtenido	90
3.4	Resultados de la definición del diagrama de flujo y selección de los equipos necesarios para el procesamiento de 5 t de empaques farmacéuticos al mes	91
3.4.1	Resultado del diagrama BFD del proceso planteado	91
3.4.2	Resultado del diagrama PFD del proceso planteado	92
3.4.2.1	Simbología utilizada en el diagrama PFD	93
3.4.3	Resultados del dimensionamiento y selección de equipos	95
3.4.3.1	Resultados del dimensionamiento del tanque de lixiviación	95
3.4.3.2	Resultados para el dimensionamiento del destilador para la recuperación del solvente	96
3.4.3.3	Resultados del dimensionamiento de la prensa hidráulica	97
3.4.3.4	Resultados del dimensionamiento del horno eléctrico	97
3.4.3.5	Balance de energía	98
3.4.4	Distribución de equipos en planta	98

3.4.5	Planificación de la producción	99
3.5	Resultados del estudio de prefactibilidad técnico-económica de una planta con capacidad de procesamiento de 5 t de empaques farmacéuticos al mes	102
3.5.1	Costos de inversión	102
3.5.2	Costos fijos	103
3.5.3	Costos variables	105
3.5.4	Ingresos por venta del producto	106
3.5.5	Resultados del estudio de prefactibilidad económica de una planta con capacidad de procesamiento de 5 t de empaques farmacéuticos al mes.	107
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
4.1	Conclusiones	110
4.2	Recomendaciones	112
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
	ANEXOS	119

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Parámetros definidos para la fundición de desechos de aluminio en mufla eléctrica	12
Tabla 1.2.	Propiedades del PVC sin plastificante	29
Tabla 1.3.	Clasificación de los disolventes	30
Tabla 1.4.	Parámetros de solubilidad para disolventes (δ_1)	33
Tabla 1.5.	Parámetros de solubilidad para polímeros (δ_2)	33
Tabla 1.6.	Resistencia química de PVC a diferentes solventes	34
Tabla 2.1.	Variación de la composición molar de las sales NaCl y KCl en los ensayos de fusión	42
Tabla 2.2.	Variación del porcentaje de carga fundente necesario en los ensayos de fusión	43
Tabla 2.3.	Variación del tiempo de fusión de las láminas de aluminio en los ensayos de fusión	44
Tabla 3.1.	Porcentaje de humedad de empaques tipo <i>blister</i>	49
Tabla 3.2.	Porcentaje de volátiles de empaques tipo <i>blister</i>	49
Tabla 3.3.	Porcentaje de carbón fijo y cenizas de empaques tipo <i>blister</i>	50
Tabla 3.4.	Resultados de densidad aparente y densidad real de los empaque tipo <i>blister</i>	51
Tabla 3.5.	Análisis químico del material metálico de los empaques tipo <i>blister</i>	52
Tabla 3.6.	Pérdida de masa de empaques tipo <i>blister</i> sometidos a proceso de lixiviación con acetona al 98%	58
Tabla 3.7.	Pérdida de masa de empaques tipo <i>blister</i> sometidos a proceso de lixiviación con acetona al 50%	60
Tabla 3.8.	Pérdida de masa de empaques tipo <i>blister</i> sometidos a proceso de lixiviación con acetona al 25%	62

Tabla 3.9.	Pérdida de masa de empaques tipo <i>blister</i> sometidos a proceso de lixiviación con acetato de n-butilo al 98%	64
Tabla 3.10.	Pérdida de masa de empaques tipo <i>blister</i> sometidos a proceso de lixiviación con acetato de n-butilo al 50%	65
Tabla 3.11.	Pérdida de masa de empaques tipo <i>blister</i> sometidos a proceso de lixiviación con acetato de n-butilo al 25%	67
Tabla 3.12.	Análisis químico del material metálico producto de la lixiviación	71
Tabla 3.13.	Porcentaje de recuperación de Al metálico obtenido en la fusión de láminas para la determinación de la composición de carga fundente	74
Tabla 3.14.	Porcentaje de recuperación de Al metálico obtenido en la fusión de láminas para la determinación de la composición de carga fundente	78
Tabla 3.15.	Porcentaje de recuperación de Al metálico obtenido en la fusión de láminas para la determinación de la temperatura de trabajo	80
Tabla 3.16.	Porcentaje de recuperación de Al metálico obtenido en la fusión de láminas para la determinación de la composición de carga fundente	82
Tabla 3.17.	Porcentaje de recuperación de Al metálico obtenido en la fusión de láminas para la determinación de la composición de carga fundente	86
Tabla 3.18.	Análisis químico del material metálico producto de la fundición	87
Tabla 3.19.	Simbología del diagrama PFD de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	93
Tabla 3.20.	Nomenclatura de los equipos del diagrama PFD de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	94
Tabla 3.21.	Composición de corrientes del diagrama PFD de la planta de recuperación de aluminio de empaques usados por la industria farmacéutica	94
Tabla 3.22.	Características del tanque de lixiviación	96
Tabla 3.23.	Características del destilador para la recuperación del solvente	97

Tabla 3.24.	Características de la prensa hidráulica	97
Tabla 3.25.	Características del horno de fusión	98
Tabla 3.26.	Costo de los equipos para la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	102
Tabla 3.27.	Costo de insumos para el arranque de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	103
Tabla 3.28.	Costos fijos generados por salarios de personal de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	104
Tabla 3.29.	Costos fijos generados en la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	104
Tabla 3.30.	Costos variables generados por compra de insumos de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	105
Tabla 3.31.	Costos variables generados por consumo energético de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	105
Tabla 3.32.	Costos variables totales generados en la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	106
Tabla 3.33.	Ingresos generados por venta del producto de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	106
Tabla 3.34.	Flujo de caja de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	108
Tabla 3.35.	Indicadores económicos obtenidos para la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i>	109
Tabla AIII.1.	Datos experimentales obtenidos en la determinación de humedad de los empaques tipo <i>blister</i>	128
Tabla AIII.2	Valores promedio obtenidos de porcentaje de material volátil, carbón fijo y cenizas de 3 muestras de empaque <i>blister</i>	129
Tabla AIII.3.	Valores promedio obtenidos de porcentaje de material volátil, carbón fijo y cenizas de 3 muestras de empaque <i>blister</i>	129

Tabla AIII.4.	Resultados de la determinación de la densidad aparente de una muestra de empaque tipo <i>blister</i>	132
Tabla AIII.5.	Resultados de la determinación de la densidad real de una muestra de empaque tipo <i>blister</i>	132
Tabla AIV.1.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 1	133
Tabla AIV.2.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 2	134
Tabla AIV.3.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 3	134
Tabla AIV.4.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 4	135
Tabla AIV.5.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 5	135
Tabla AIV.6.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 6	136
Tabla AIV.7.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 7	136
Tabla AIV.8.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 8	137
Tabla AIV.9.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 9	137
Tabla AIV.10.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 10	138
Tabla AIV.11.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 11	138
Tabla AIV.12.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 12	139
Tabla AIV.13.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 13	139
Tabla AIV.14.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 14	140
Tabla AIV.15.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 15	140
Tabla AIV.16.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 16	141
Tabla AIV.17.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 17	141
Tabla AIV.18.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 18	142
Tabla AIV.19.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 19	142
Tabla AIV.20.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 20	143
Tabla AIV.21.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 21	143
Tabla AIV.22.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 22	144
Tabla AIV.23.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 23	144

Tabla AIV.24.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 24	145
Tabla AIV.25.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 25	145
Tabla AIV.26.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 26	146
Tabla AIV.27.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 27	146
Tabla AIV.28.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 28	147
Tabla AIV.29.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 29	147
Tabla AIV.30.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 30	148
Tabla AIV.31.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 31	148
Tabla AIV.32.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 32	149
Tabla AIV.33.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 33	149
Tabla AIV.34.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 34	150
Tabla AIV.35.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 35	150
Tabla AIV.36.	Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 36	151
Tabla AV.1.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 1	152
Tabla AV.2.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 2	153
Tabla AV.3.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 3	153
Tabla AV.4.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 4	154
Tabla AV.5.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 5	154
Tabla AV.6.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 6	155
Tabla AV.7.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 7	155
Tabla AV.8.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 8	156
Tabla AV.9.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 9	156
Tabla AV.10.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 10	157
Tabla AV.11.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 11	157
Tabla AV.12.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 12	158
Tabla AIV.13.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 13	158

Tabla AV.14.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 14	159
Tabla AV.15.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 15	159
Tabla AV.16.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 16	160
Tabla AV.17.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 17	160
Tabla AV.18.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 18	161
Tabla AV.19.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 19	161
Tabla AV.20.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 20	162
Tabla AV.21.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 21	162
Tabla AV.22.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 22	163
Tabla AV.23.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 23	163
Tabla AV.24.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 24	164
Tabla AV.25.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 25	164
Tabla AV.26.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 26	165
Tabla AV.27.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 27	165
Tabla AV.28.	Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 28	166
Tabla VII.1.	Hoja de especificación del tanque seleccionado para el proceso de lixiviación de empaque farmacéuticos tipo <i>blister</i>	170
Tabla VII.2.	Hoja de especificación del tanque seleccionado para el proceso recuperación de solvente	171
Tabla VII.3.	Hoja de especificación de la prensa hidráulica seleccionada	172
Tabla VII.4.	Hoja de especificación del horno eléctrico seleccionado para procesos de fundición de aluminio	173
Tabla VII.5.	Hoja de especificación la caldera escogida para la generación de vapor	175

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1	Evolución del reciclaje de latas de aluminio en algunos países	1
Figura 1.2.	Producción de aluminio primario y secundario	2
Figura 1.3.	Diagrama de fabricación de productos de aluminio	3
Figura 1.4.	Diagrama de fases del sistema NaCl-KCl	6
Figura 1.5.	Diagrama de fases del sistema NaCl-KCl -NaF	7
Figura 1.6.	Efecto de la adición de fluoruros al sistema NaCl-KCl en la tensión interfacial sales/aluminio	8
Figura 1.7.	Porcentaje de recuperación de aluminio en función del porcentaje de carga	9
Figura 1.8.	Mecanismos de interacción entre las sales fundentes y la capa de óxido de aluminio	10
Figura 1.9.	Variación de la recuperación de aluminio con la composición de la mezcla de sales fundentes para cada temperatura de trabajo de limallas de corte de perfiles	12
Figura 1.10.	Variación de la recuperación de aluminio con el tiempo para cada temperatura de trabajo de limallas de corte de perfiles	13
Figura 1.11.	Esquema de un horno rotatorio en el reciclaje de aluminio	15
Figura 1.12.	Esquema de un horno de reverbero	16
Figura 1.13.	Diagrama de un horno usando antorcha de plasma	17
Figura 1.14.	Diagrama de un horno de arco eléctrico	18
Figura 1.15.	Configuración básica empaque <i>blister</i>	19
Figura 1.16.	Componentes básicos del empaque <i>blister</i>	20
Figura 1.17.	Diagrama de ensamblaje de empaques tipo <i>blister</i>	24
Figura 1.18.	Diagrama del proceso Vinyloop	26
Figura 1.19.	Diagrama del proceso de combustión de PVC en dos etapas	27

Figura 2.1.	Diagrama del equipo utilizado para los ensayos de fusión de láminas de aluminio	36
Figura 2.2.	Diagrama del equipo de extracción soxhlet marca Selecta	39
Figura 2.3.	Cartucho de celulosa con material tipo <i>blister</i>	39
Figura 2.4.	Diagrama del equipo utilizado para los ensayos de fusión de láminas de aluminio	41
Figura 3.1.	a) Lámina de material polimérico transparente, b) Lámina de material polimerico con coloración naranja	53
Figura 3.2.	Espectro infrarrojo de la lámina de polímero transparente del material tipo <i>blister</i>	54
Figura 3.3.	Espectro infrarrojo de la lámina de polímero transparente del material tipo <i>blister</i> superpuesto a un estándar de PVC	54
Figura 3.4.	Espectro infrarrojo de la lámina de polímero color naranja del material tipo <i>blister</i>	55
Figura 3.5	Espectro infrarrojo de la lámina de polímero de coloración naranja del material tipo <i>blister</i> superpuesto a un estándar de PVC	55
Figura 3.6	Difractograma de rayos X de la lámina metálica del empaque tipo <i>blister</i>	56
Figura 3.7	Porcentaje de pérdida de masa de PVC de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i> respecto al tiempo de lixiviación usando como solvente acetona al 98%	58
Figura 3.8	Fotografía de los productos obtenidos por lixiviación de empaques tipo <i>blister</i> usando como solvente acetona al 98%	59
Figura 3.9	Porcentaje de pérdida de masa de PVC de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i> respecto al tiempo de lixiviación usando como solvente acetato de n-butilo al 50%	60
Figura 3.10	Fotografía de los productos obtenidos por lixiviación de empaques tipo <i>blister</i> usando como solvente acetona al 50%	61
Figura 3.11.	Porcentaje de pérdida de masa de PVC de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i> respecto al tiempo de lixiviación usando como solvente acetona al 25%	62

Figura 3.12.	Fotografía de los productos obtenidos por lixiviación de empaques tipo <i>blister</i> usando como solvente acetona al 25%	63
Figura 3.13.	Porcentaje de pérdida de masa de PVC de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i> respecto al tiempo de lixiviación usando como solvente acetato de n-butilo al 98%	64
Figura 3.14.	Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de lixiviación utilizando como solvente acetato de n-butilo al 98% durante 150 min	65
Figura 3.15.	Porcentaje de pérdida de masa de PVC de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i> respecto al tiempo de lixiviación usando como solvente acetato de n-butilo al 50%	66
Figura 3.16.	Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de lixiviación utilizando como solvente acetato de n-butilo al 50% durante 180 min	67
Figura 3.17.	Porcentaje de pérdida de masa de PVC de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i> respecto al tiempo de lixiviación usando como solvente acetato de n-butilo al 25%	68
Figura 3.18	Porcentaje de pérdida de masa de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i> sometidos a procesos de lixiviación con acetona y acetato de n-butilo al 98%, 50% y 25%	69
Figura 3.19.	Porcentaje de pérdida de masa de empaques farmacéuticos tipo <i>blister</i> sometidos a procesos de lixiviación con acetato de n-butilo 98 % puro y recuperado	70
Figura 3.20.	Difractograma de rayos X del producto obtenido después del proceso de lixiviación	72
Figura 3.21.	Difractograma de rayos X de una muestra de láminas de aluminio sin someterse a lixiviación superpuesto a una muestra sometida a lixiviación	73
Figura 3.22.	Porcentaje de recuperación de la fase metálica respecto a la composición molar de NaCl al realizar procesos de fundición de láminas de aluminio	75
Figura 3.23.	Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de laminas de Al como indica el Ensayo No.5	76
Figura 3.24.	Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de laminas de Al como indica el Ensayo No.6	77

Figura 3.25.	Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de laminas de Al como indica el Ensayo No.7	77
Figura 3.26.	Porcentaje de recuperacion de la fase metálica respecto al porcentaje de carga fundente al realizar procesos de fundición de láminas de aluminio	79
Figura 3.27.	Porcentaje de recuperacion de la fase metálica respecto al porcentaje de carga fundente al realizar procesos de fundición de láminas de aluminio	81
Figura 3.28.	Porcentaje de recuperacion de la fase metálica respecto al tiempo al realizar procesos de fundición de láminas de aluminio	83
Figura 3.29.	Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de laminas de Al como indica el Ensayo No.23	83
Figura 3.30.	Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de laminas de Al como indica el Ensayo No.24	84
Figura 3.31.	Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de laminas de Al como indica el Ensayo No.25	84
Figura 3.32.	Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de laminas de Al como indica el Ensayo No.26	85
Figura 3.33.	Imagen reportada por microscopía electrónica a 355x aumentos de una muestra de aluminio fundido	88
Figura 3.34.	Imagen reportada por microscopía electrónica al realizar análisis semicuantitativo de una muestra de aluminio fundido (355x)	88
Figura 3.35.	Imagen reportada por microscopía electrónica a 1000x aumentos de una muestra de aluminio fundido	89
Figura 3.36.	Imagen reportada por microscopía electrónica al realizar análisis semicuantitativo de una muestra de aluminio fundido (1000x)	89
Figura 3.37.	Difractograma de rayos X del producto metálico obtenido por fundición	90
Figura 3.38.	Diagrama BFD de la planta de recuperación de aluminio de los empaques tipo <i>blister</i> usados por la industria farmacéutica	92

Figura 3.39.	Diagrama PFD de la planta de recuperación de aluminio de los empaques tipo <i>blister</i> usados por la industria farmacéutica	94
Figura 3.40.	LAY OUT de la planta de recuperación de aluminio de los empaques tipo <i>blister</i> usados por la industria farmacéutica	100
Figura 3.41.	Vías de movimiento dentro de la planta de recuperación de aluminio de los empaques tipo <i>blister</i> usados por la industria farmacéutica.	101
Figura 3.42.	Planificación de la producción de la planta de recuperación de aluminio de los empaques tipo <i>blister</i> usados por la industria farmacéutica	99
Figura AVII.1.	Tanque de lixiviación	170
Figura AVII.2.	Destilador	171
Figura AVII.3.	Prensa hidráulica	172
Figura AVII.4.	Horno de Fusión	174
Figura AVII.5.	Caldera	175

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Hoja de seguridad del acetato de la acetona	120
ANEXO II Hoja de seguridad del acetato de n-butilo	124
ANEXO III Caracterización física de los empaques utilizados por la industria farmacéutica	126
ANEXO IV Ensayos de lixiviación para la definición de las mejores condiciones de lixiviación utilizando solventes orgánicos (acetona y acetato de n butilo)	133
ANEXO V Ensayos de fusión para la definición de las mejores condiciones de operación utilizando sales de cloro y flúor	152
ANEXO VI Cálculos de las corrientes para los diagramas BFD y PFD	167
ANEXO VII Hojas de especificaciones de los equipos seleccionados	170
ANEXO VIII Ejemplos de cálculo del estudio de prefactibilidad técnico- económica de una planta con capacidad de procesamiento de 5 t/mes de empaques farmacéuticos	176

RESUMEN

Se ha desarrollado un proceso para la recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*, mediante lixiviación de PVC con solventes orgánicos y fusión de las láminas de aluminio con sales de cloro y fluor.

Se determinaron las condiciones de lixiviación de PVC mediante el uso de acetona y acetato de n-butilo puros y en solución con metanol al 50 % v/v y 25 % v/v, durante 180 min en intervalos de 30 min cada uno. Las láminas metálicas recuperadas, previamente prensadas, fueron sometidas a ensayos de fusión variando parámetros de composición molar de sales fundentes, porcentaje de carga, temperatura y tiempo. Los productos se caracterizaron mediante espectrofotometría de chispa y por difracción de rayos X.

Con base en los resultados obtenidos, los empaques farmacéuticos tipo blister requieren de una lixiviación con acetato de n-butilo al 98 % durante 150 min, de esta forma se asegura la separación del material polimérico de las láminas metálicas. El proceso de fundición se realiza con una composición molar de sales de 60 % de NaCl y 40 % de KCl, 200 % de carga fundente a 750 °C durante 1,75 h. Se alcanzó una recuperación del 65 % de aluminio metálico con una pureza del 98,57 %.

La planta de recuperación de aluminio con una capacidad de 5 t/mes se compone por un tanque de lixiviación, una prensa hidráulica, un tanque de recuperación de solvente y un horno eléctrico. El producción de vapor se realiza mediante un caldero que funciona con GLP como combustible.

Finalmente se realizó un estudio de pre factibilidad económica, Los indicadores analizados reportaron un valor actual neto de 12 362,31 \$, una tasa interna de retorno del 27,85 % y una relación beneficio costo de 1,87. Por lo tanto, el proyecto es económicamente viable de acuerdo a las condiciones planteadas en este trabajo.

INTRODUCCIÓN

El aluminio ocupa el segundo puesto a nivel mundial de producción y consumo, después del acero. Además, es el elemento metálico de mayor abundancia en la corteza terrestre. La importancia de su producción radica en sus innumerables aplicaciones dentro de las cuales se tiene construcción, electricidad, maquinaria, etc. Propiedades como alta resistencia a la corrosión, capacidad de deformación, conductividad eléctrica, baja densidad y no toxicidad han hecho que el consumo de aluminio incremente de forma acelerada en los últimos 100 años (Boin y Bertram, 2005, p. 26; DeGarmo, Black, Kohser, 1994, p. 123).

La producción de aluminio secundario o reciclaje de aluminio requiere tan solo el 5 % de la energía que se emplea para producir la misma cantidad de aluminio por el proceso primario. Durante el proceso de fundición la estructura atómica del aluminio no se ve alterada por lo cual es posible reciclarlo repetidamente sin perder calidad ni valor económico del producto final (EAA y OEA, 2004, p. 8; Rubinos, 2007, pp. 46-48).

La demanda de producción de empaques farmacéuticos muestra una tendencia creciente debido al interés de cada compañía por dar protección a sus productos. Los empaques *blister* aseguran la protección de medicamentos durante una larga vida útil. El proceso básico de producción de blíster consiste en el calentamiento del plástico, formación de cavidades *blister*, colocación del producto en la ampolla y sellado con el material tapa. El film plástico que forma parte de los empaques tipo *blister* casi siempre es el PVC, en ocasiones se adicionan ciertos componentes para mejorar la barrera de paso de oxígeno y vapor de agua mientras que el film metálico corresponde a aluminio debido a su alta capacidad de laminado y la facilidad de acceso al producto (Pilchik, 2000a, p.72,76; Pilchik, 2000b, p. 56).

Durante los procesos de incineración de PVC se generan compuestos tóxicos llamados dioxinas y furanos, razón por la cual el uso de este tipo de material plástico ha sido cuestionado durante los últimos años. La generación de este tipo de compuestos son considerados una amenaza tanto para la salud humana como para

el medio ambiente. La exposición excesiva puede ocasionar problemas al corazón, sistema inmune, pulmones y cancer. Por tanto, es necesario establecer una prevención de contaminación reduciendo la práctica de este tipo de procesos (Belliveau, 2003, p. 1).

La problemática actual de las empresas dedicadas al tratamiento y disposición de residuos, radica en la incapacidad de realizar procesos de incineración a este tipo de material, debido a las razones expuestas anteriormente. Dentro de este proyecto se desea establecer un proceso técnico para el aprovechamiento de los componentes que los residuos *blister*.

Endara (2008) propuso un método de recuperación de aluminio de los empaques *blister* mediante la lixiviación con metil isobutil cetona como solvente del material polimérico, con lo cual se evita la incineración de los mismos. (p. 46). Por su parte, Estrella (2013) realizó ensayos de lixiviación con solventes orgánicos para recuperar aluminio de láminas de polietileno. (p. 44-48). Finalmente, Yépez (2010) establece una metodología para procesos de fusión en presencia de sales de cloro y flúor (pp. 54-69).

El presente trabajo busca dar una alternativa técnica para el reciclaje de empaques farmacéuticos tipo *blister*, debido a la problemática de disposición post consumo de los mismos; además de una valorización de los residuos industriales y aporte al cuidado del medio ambiente. Finalmente, se realiza un análisis de prefactibilidad económica con el fin de evaluar la rentabilidad del proceso.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 RECICLAJE DE ALUMINIO

En la actualidad, un tercio del aluminio total que se consume en el mundo proviene de procesos de reciclado. Durante el proceso de fundición la estructura atómica del aluminio no se ve alterada por lo cual es posible reciclarlo repetidamente sin perder calidad ni valor económico del producto final (EAA y OEA, 2004, p. 8; Rubinos, 2007, pp. 46-48).

La producción primaria de una tonelada métrica de aluminio requiere 51 739 kWh de energía, mientras que el proceso secundario requiere de 3 247 kWh, para la producción de la misma cantidad. Es decir, se presenta una disminución del 93 % de consumo de energía al realizar procesos de reciclaje. Además de una disminución hasta del 85 % de generación de residuos sólidos. Desde el punto de vista ambiental, otra de las ventajas es la reducción de la explotación de recursos minerales (Schlesinger, 2013, p. 6; Totten y MacKenzie, 2003, p. 116).

En la Figura 1.1, se muestra la evolución del reciclaje de latas de aluminio en algunos países desde 1991 a 1999 (Totten y MacKenzie, 2003, p. 117).

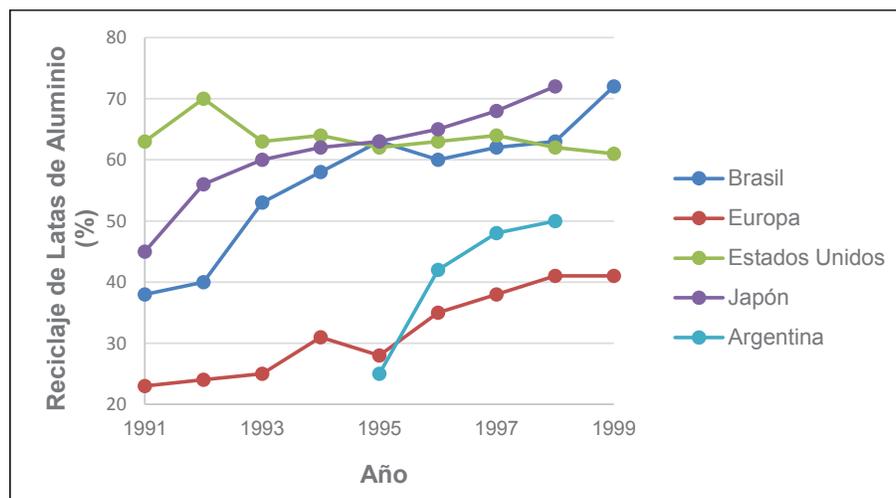


Figura 1.1. Evolución del reciclaje de latas de aluminio en algunos países (Totten y Mackenzie, 2003, p. 117) Modificado

En la Figura 1.2, se muestra el rango de producción de aluminio primario y secundario desde 1950 hasta una proyección del 2020. Para el aluminio primario se tiene una tendencia decreciente respecto al tiempo, mientras que para el reciclaje se muestra una tendencia creciente y con una proyección a futuro que sigue la misma preferencia (Schlesinger, 2013, p. 1).

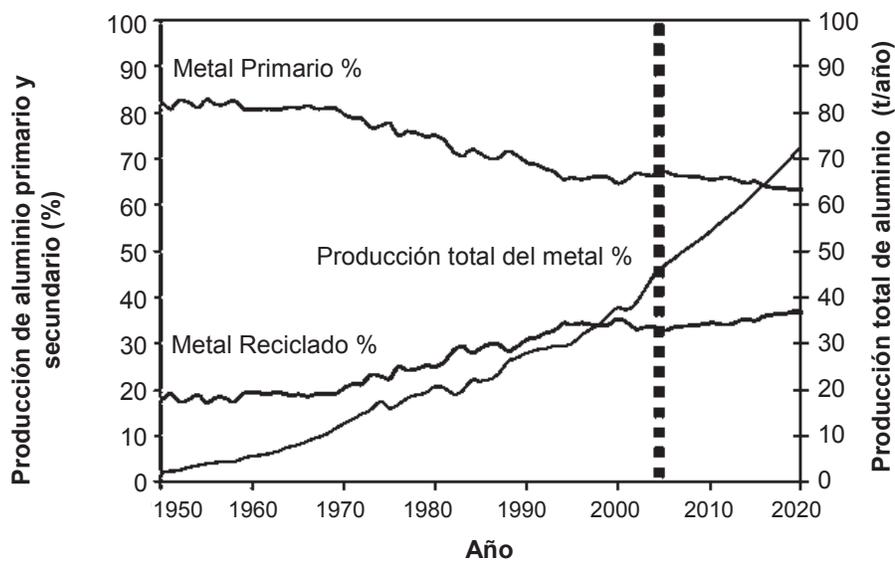


Figura 1.2. Producción de aluminio primario y secundario (Schlesinger, 2013, p. 2) Modificado

El reciclaje de aluminio permite la disminución de costos de capital. En el proceso primario se requiere realizar operaciones de minería, una planta de extracción y celdas electrolíticas. En su caso, la recuperación de aluminio secundario, requiere equipos menos complejos y por consecuencia menos costosos. De forma estimada la reducción de capital es del 85 % aproximadamente (Schlesinger, 2013, p. 8).

Existen dos fuentes de materia prima destinada al reciclaje de aluminio: la chatarra de material usado y los subproductos de la transformación de aluminio como virutas, recortes, piezas moldeadas, etc. Es necesario realizar un tratamiento preliminar a la fusión debido a la presencia de impurezas que pueden afectar la calidad del producto final (Gandía y Gil, 2004, p. 6).

En Ecuador, existen empresas dedicadas a la producción y distribución de productos de aluminio. Dentro de su materia prima se incluye chatarra de aluminio

que puede ser fundida. En la Figura 1.3, se muestra un diagrama del proceso de fabricación de productos de aluminio.

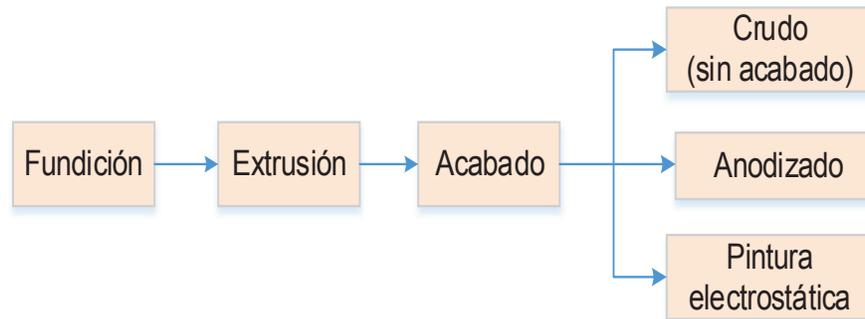


Figura 1.3. Diagrama de fabricación de productos de aluminio

El proceso de fundición utiliza como materia prima chatarra adquirida de proveedores externos, aluminio residual de los procesos de extrusión, perflería rechazada y aluminio virgen, con el fin de garantizar la composición del producto final. En esta área existen controles metalúrgicos estrictos para cada tipo de aleación que se produce (Granda y Plaza, 2012, p. 9; Pérez y Salazar, 2007, p. 27)

La extrusión es un proceso de deformación para obtener productos largos como tubos, alambres, secciones huecas o llenas. El principio consiste en aplicar fuerzas de compresión sobre un bloque de metal a través de una matriz, a temperaturas entre 480 °C y 550 °C; de esta manera, el perfil toma la forma dada por el molde. Existe una amplia gama de matrices por tanto se puede obtener productos sencillos o de complejas formas geométricas (Granda y Plaza, 2012, p. 10; Pérez y Salazar, 2007, p. 28)

Dentro de los procesos de acabado se tiene productos crudos o sin acabado, anodizado y pintura electrostática. El anodizado es un proceso electroquímico que consiste en depositar sobre la superficie del perfil extruido un recubrimiento de óxido de aluminio. La tonalidad depende del tamaño de corriente, pH empleado, tiempo y sales minerales usadas durante el proceso. Las ventajas del anodizado son que el material es mucho más resistente que la pintura convencional, la capa no sufre desgaste y el color logrado es más profundo. El proceso pintura consiste principalmente depositar pintura en polvo de forma electro-estática sobre el perfil

para después ser fundida y curada en un horno; de esta forma, se logra tener una sola película de espesor uniforme (Granda y Plaza, 2012, p. 11-14; Pérez y Salazar, 2007, p. 30)

1.1.1 PRINCIPALES PROBLEMAS EN LA METALURGIA SECUNDARIA DEL ALUMINIO

El principal problema en los procesos de fusión del aluminio es la contaminación superficial que sufre el material debido a su alta reactividad. El aluminio al ser expuesto a la atmósfera forma una capa protectora de óxido. El tamaño tiene influencia directa sobre este aspecto; de tal forma que, el área superficial reaccionante aumenta al tener fracciones más pequeñas del material (Román, 1992, pp. 151-152)

Por otro lado, debido a la alta reactividad del aluminio a temperaturas elevadas se puede favorecer la formación de nitruros y carburos debido a la presencia de nitrógeno y carbono. Como consecuencia se afecta de forma negativa en las propiedades metálicas del producto (Román, 1992, pp. 151-152).

Debido a los factores expuestos anteriormente, la técnica de fusión que se realice debe evitar el contacto de la llama con la carga activa, utilizar cargas fundentes apropiadas que eviten la formación de óxidos e incluir sistemas de agitación para favorecer el contacto de las partículas del metal (Román, 1992, pp. 151-152).

En forma general, para favorecer el proceso los fundentes deben presentar un punto de fusión ligeramente superior y densidad menor al metal, tensión superficial baja y costo no elevado. Generalmente, las cargas fundentes están compuestas por cloruros de calcio, sodio, potasio, magnesio y zinc, fluoruro de sodio y criolita. El uso de fluoruros disminuye la tensión superficial de la capa aislante (Román, 1992, pp. 151-152).

1.1.2 FUSIÓN DE ALUMINIO CON SALES DE CLORO Y FLÚOR

El proceso de reciclaje de aluminio es realizado utilizando sales como carga fundente. Estas sales deben tener puntos de fusión por debajo de los 720 °C, no reaccionar con el metal, no ser causante de impurezas durante el proceso, no ser higroscópico y presentar presión de vapor baja. La adición de estas sales se realiza con el fin de proteger el material fundido de la oxidación, ayuda a remover la capa de óxido formada durante el calentamiento del horno, promover la coalescencia de gotas de aluminio y mantener el material oxidado en suspensión (Totten y MacKenzie, 2003, p. 126).

Generalmente, la composición de la carga fundente consiste en cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl). Además, se agregan sales de flúor como criolita (Na_3AlF_6), fluoruro de sodio (NaF), fluoruro de potasio (KF), fluoruro de calcio (CaF_2) y fluoruro de magnesio (MgF_2). Las ventajas del uso de sales como carga fundente durante el proceso de fusión es el bajo costo y la facilidad de operación. El principal inconveniente es la producción de un subproducto que debe ser tratado antes de su disposición final (Totten y MacKenzie, 2003, p. 126).

Existen 5 aspectos fundamentales que influyen en el proceso de fusión del aluminio los mismos que se exponen en las siguientes secciones.

1.1.2.1 Diagramas de fase de los cloruros y fluoruros

Los diagramas de fases son representaciones gráficas del equilibrio químico de dos sustancias tomando como parámetros la temperatura, la presión y la concentración. Su utilidad reside en la facilidad para entender el comportamiento de un sistema que se encuentre en equilibrio, su composición y las cantidades relativas de cada una (Cisternas, 2009, p. 17).

El sistema compuesto por las sales NaCl y KCl es el más utilizado. El punto de fusión de los compuestos puros son 802 °C y 775 °C, respectivamente.

Generalmente, se trabaja con una composición equimolar de estas dos sales debido a la presencia de un eutéctico con una temperatura de 667 °C. En la Figura 1.4, se muestra el diagrama de fase de este sistema (Totten y MacKenzie, 2003, p. 128).

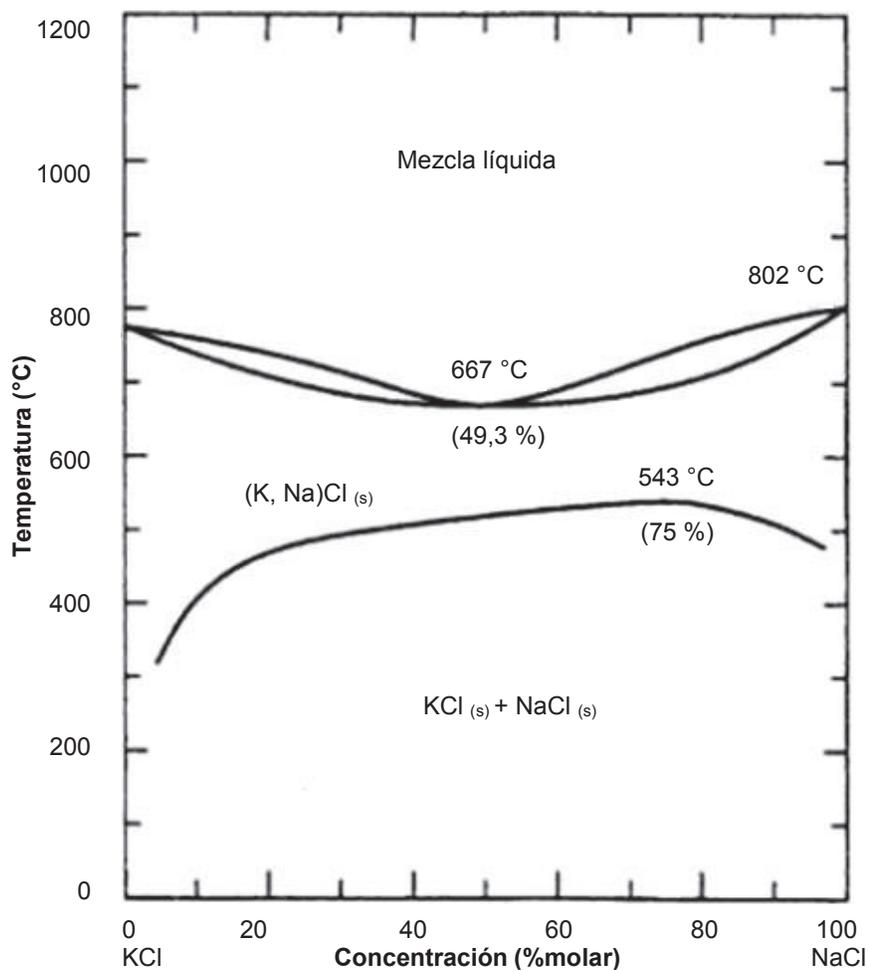


Figura 1.4. Diagrama de fases del sistema NaCl-KCl
(Totten y Mackenzie, 2003, p. 129) Modificado

Con la finalidad de aumentar la recuperación de aluminio, se suele añadir sales de flour, éstas se encargan de aumentar la coalescencia de las gotas de aluminio formadas durante la fusión. Al combinar cloruros y fluoruros en las cargas fundentes, es necesario trabajar con diagramas de fase ternarios. El sistema ternario más empleado está compuesto por cloruro de sodio, cloruro de potasio y fluoruro de sodio (Totten y MacKenzie, 2003, p. 128).

En la Figura 1.5, se muestra el diagrama del sistema NaCl-KCl-NaF (Totten y MacKenzie, 2003, p. 128).

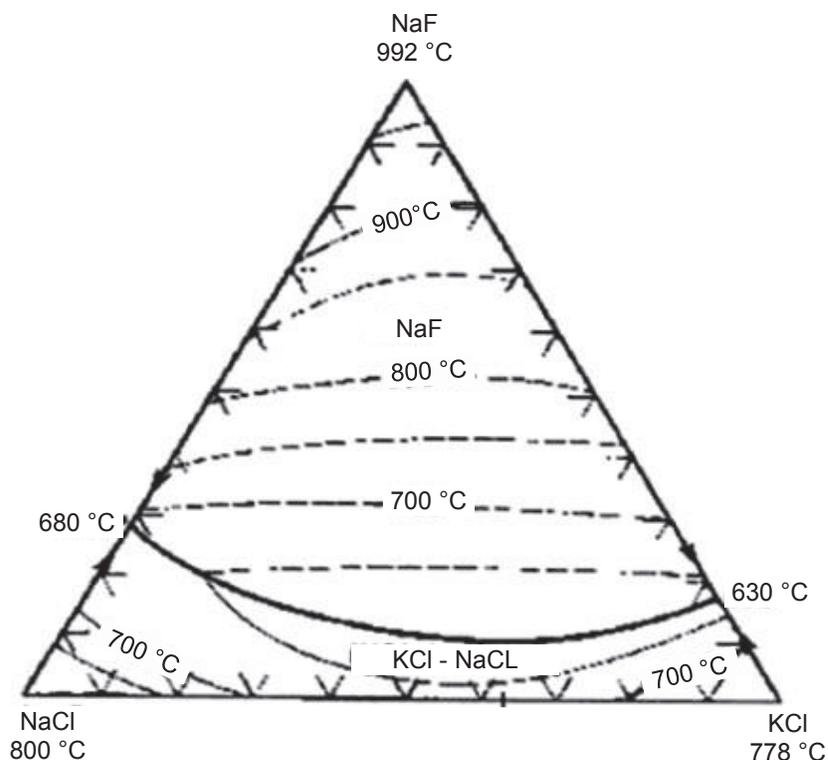


Figura 1.5. Diagrama de fases del sistema NaCl-KCl-NaF
(Totten y Mackenzie, 2003, p. 130) Modificado

1.1.2.2 Tensión interfacial entre el metal y la sal

La adición de fluoruros a la carga fundente en una concentración molar máxima de 10 %, favorece el proceso de fusión ya que disminuye la tensión interfacial del sistema aluminio-sales. La eficiencia de las sales en forma creciente sigue el siguiente orden: $\text{Na}_3\text{AlF}_6 < \text{LiF} < \text{CaF}_2 < \text{MgF}_2 < \text{NaF} < \text{KF}$.

En la Figura 1.6, se muestra la dependencia de la concentración de los fluoruros con la tensión interfacial para el sistema equimolar NaCl-KCl. Como se puede observar a medida en el rango de 0 a 10 % para todas las sales se tiene una disminución y el KF presenta la mayor eficiencia (Totten y MacKenzie, 2003, p. 129).

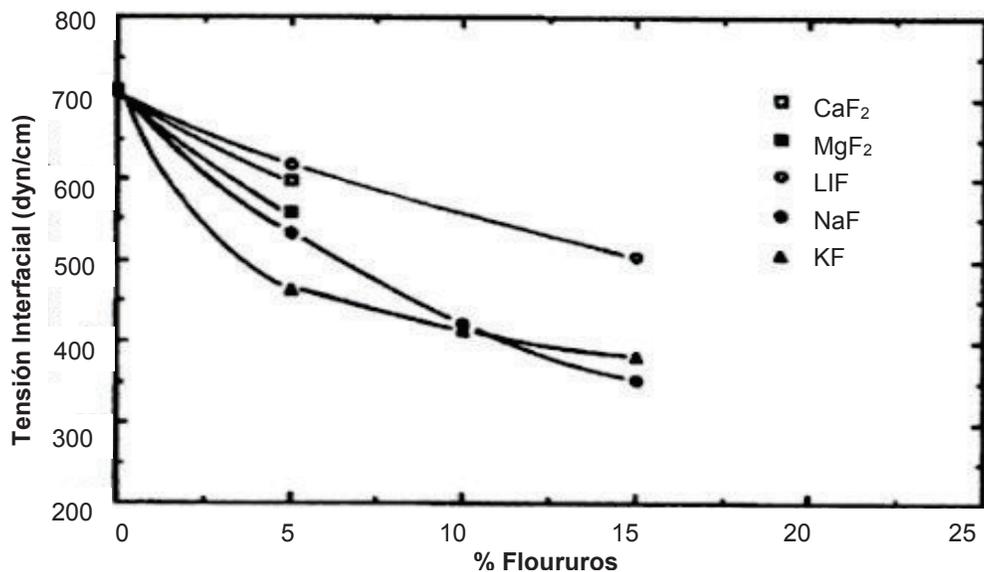


Figura 1.6. Efecto de la adición de fluoruros al sistema NaCl -KCl en la tensión interfacial sales/aluminio
(Totten y Mackenzie, 2003, p. 130) Modificado

1.1.2.3 Poder de coalescencia de la carga fundente

La coalescencia puede ser definida como la capacidad que tienen las gotas de aluminio para unirse entre ellas y hacer que la masa de fundido incremente. Al trabajar con mezclas fundentes de cloruros no se tiene mayor influencia; al contrario, al utilizar sales de fluor dentro de la mezcla se mejora la efectividad de este parámetro. Este fenómeno puede ser explicado debido a la variación en la viscosidad del fluido dependiendo de su Composición; y ésta a su vez guarda relación inversamente proporcional con la eficiencia de unión de las gotas de aluminio metálico (Totten y MacKenzie, 2003, p. 130-133).

1.1.2.4 Efecto de la composición en el rendimiento del proceso

La eficiencia de recuperación de aluminio en los proceso de fusión depende directamente de la composición de la carga fundente utilizada. Como se mencionó

anteriormente, una composición equimolar de NaCl y KCl con la adición de fluoruros presenta los rendimientos más altos (Totten y MacKenzie, 2003, pp.140 -143).

En la Figura 1.7, se puede observar el porcentaje de recuperación de aluminio en función del porcentaje de contenido de sales. Con cantidades de carga fundente del orden de 5 al 15 % se logran recuperaciones alrededor de 85 %. La gráfica se ha construido para una carga fundente equimolar de NaCl con KCl. Además, se ha evidenciado que al adicionar sales de flúor a la carga fundente, el porcentaje de recuperación de aluminio puede incrementarse hasta un 10 %. Esta adición se realiza en un rango de 0 a 20 % de KF de contenido (Totten y MacKenzie, 2003, pp. 140-143).

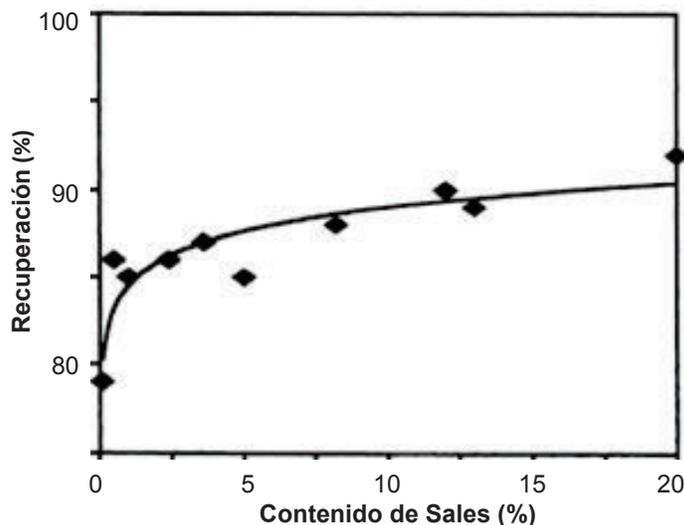


Figura 1.7. Porcentaje de recuperación de aluminio en función del porcentaje de carga. (Totten y Mackenzie, 2003, p. 143) Modificado

1.1.2.5 Interacción entre la capa de óxido de aluminio y las sales fundentes

Generalmente, los desechos de aluminio poseen en la superficie una capa de óxido que necesita ser removida para la recuperación del aluminio metálico. La mezcla de sales fundentes es la que se encarga de atacar dicha capa. En la Figura 1.8, se presenta el mecanismo de remoción del óxido superficial. En primer lugar, las sales fundidas interactúan con la capa de óxido (a), el ataque debilita y fractura la

superficie (b), las sales ingresan en los espacios formados por las fracturas (c), los fragmentos de óxido se separan del aluminio metálico (d), y finalmente, se forman las gotas de aluminio que posteriormente formaran aglomerados entre sí (e) (de la Torre, Guevara, Yépez, 2009, p. 38)

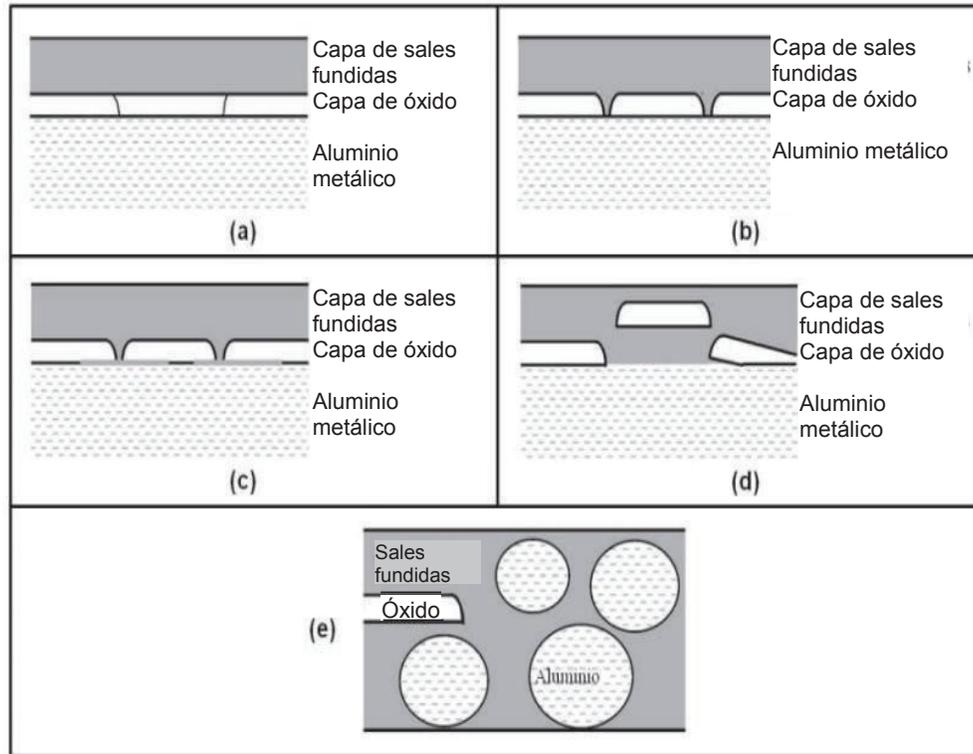


Figura 1.8. Mecanismos de interacción entre las sales fundentes y la capa de óxido de aluminio

(de la Torre et al, 2009, p. 38) Modificado

Las cargas fundentes compuestas por cloruros presentan solubilidades de alumina prácticamente nulas, mientras que las que contienen fluoruros en sus composiciones ayudan a la solubilidad del óxido. Siguiendo un orden creciente de mejoramiento de solubilidad las sales de flúor se presentan en este orden $\text{NaF} > \text{CaF}_2 > \text{KF}$. Sin embargo, la adición de fluoruros no siempre es beneficiosa en el proceso de fusión, debido a que sus puntos de fusión elevados (alrededor de $950\text{ }^\circ\text{C}$) provocan que la mezcla se vuelva mas densa y la recuperación de aluminio disminuya (Totten y MacKenzie, 2003, pp. 133-135).

1.1.2.6 Reciclaje de aluminio a partir de residuos industriales y electrónicos en presencia de sales

Dentro de la producción secundaria de aluminio se presentan dos campos de tratamiento. El primero constituye la recuperación de aluminio por fundición de la chatarra es decir material que contiene aluminio que ha sido desechado. El segundo es la recuperación de aluminio a partir de las escorias generadas por procesos de fundición (Totten y MacKenzie, 2003, p. 116).

Yépez (2010) realizó un estudio sobre el reciclaje de aluminio de desechos industriales y electrónicos. El análisis incluyó disipadores de calor, limallas de extrusión, limallas de corte de perfiles y escoria de fundición de chatarra. En primer lugar, se seleccionó el horno de trabajo para los ensayos de fundición posteriores, para lo cual se evaluó la recuperación de aluminio a diferentes temperaturas en 3 tipos de equipos: horno de crisol a gas, horno tubular y mufla eléctrica. Una vez que se seleccionó el horno se realizaron ensayos de fundición de cada una de las materias primas. Los parámetros analizados fueron la concentración de cada sal de cloro dentro de la mezcla de sales fundentes, la carga de sales respecto a la carga de desechos de aluminio, el tipo de fundición, la influencia de la adición de sales de flúor a la mezcla fundente y la implementación de agitación mecánica durante el proceso de fusión (p. 54).

Con base en los resultados experimentales obtenidos, se estableció que la mejor opción para la fundición de desechos de aluminio es la mufla eléctrica ya que permite obtener mayores porcentajes de recuperación. Al trabajar en ausencia de flujo de aire no se incrementa la oxidación del material que se desea fundir. Finalmente, el producto no presenta impurezas debido al uso de energía eléctrica (Yépez, 2010, p. 93).

En la Tabla 1.1, se muestran los parámetros de operación definidos para la fundición de desechos de aluminio en mufla eléctrica.

Tabla 1.1. Parámetros definidos para la fundición de desechos de aluminio en mufla eléctrica

Material	T (°C)	Carga de sales (%)	Composición (% mol)		Tiempo (min)	Recuperación (%)
			KCl	NaCl		
Disipadores de calor	850	100	90	10	60	97,6
Limallas de la extrusión de aluminio	850	50	70	30	20	98,5
Limallas de corte de perfiles de aluminio	850	100	100	0	30	93,6
Escoria de fundición de chatarra de aluminio	850	30	50	50	120	71,6

En la Figura 1.9, se muestra la recuperación de aluminio al variar la composición de mezcla de sales fundentes al trabajar con limallas de corte de perfiles. Yépez (2010) obtuvo recuperaciones menores al 90 % debido al tamaño de partícula de la materia prima y la facilidad de oxidación. (p. 157)

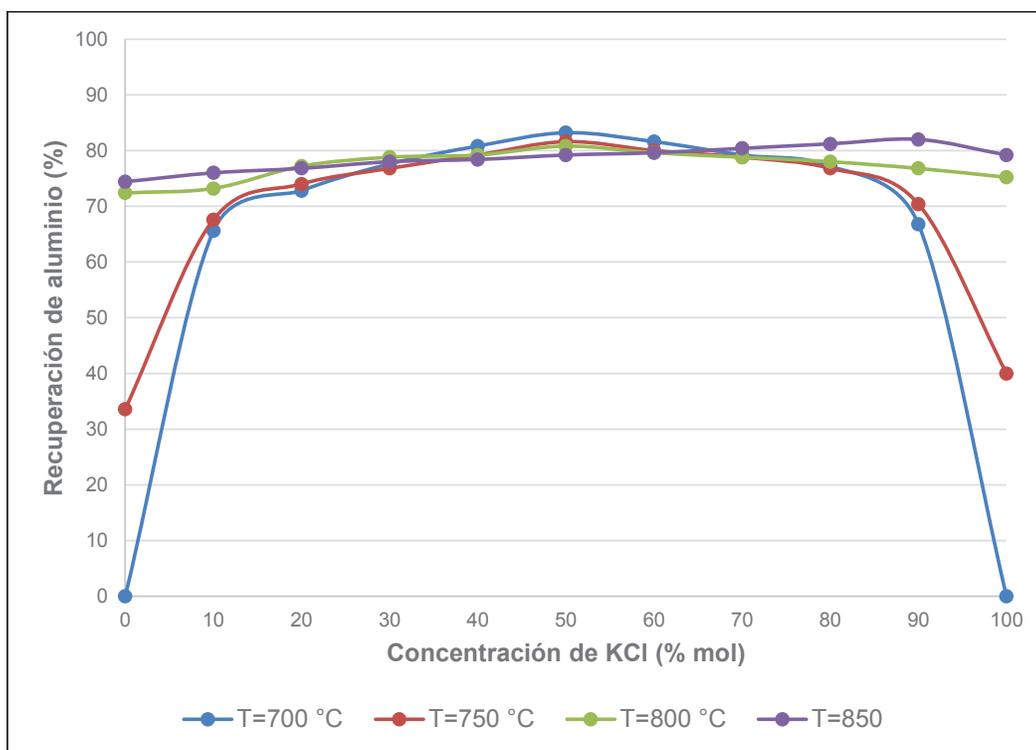


Figura 1.9. Variación de la recuperación de aluminio con la composición de la mezcla de sales fundentes para cada temperatura de trabajo de limallas de corte de perfiles (Yépez, 2010, p. 157)

En la Figura 1.10, se muestran los resultados de recuperación de aluminio obtenidos por Yépez (2010) al variar el tiempo de fundición de limallas de corte de perfiles (p. 157).

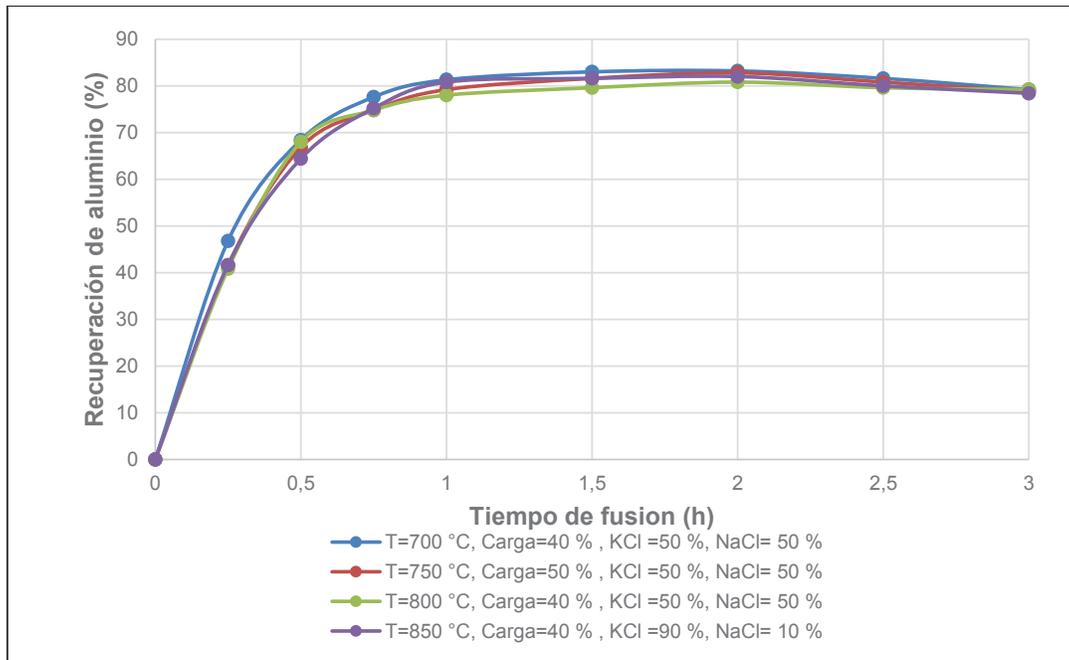


Figura 1.10. Variación de la recuperación de aluminio con el tiempo para cada temperatura de trabajo de limallas de corte de perfiles (Yépez, 2010, p. 157)

La adición de fluoruro de sodio a la carga de sales fundentes provoca una disminución en el porcentaje de recuperación de aluminio, debido a que la mezcla se torna mas espesa y no se logra un recubrimiento adecuado al material. De igual manera al adicionar fluoruro de calcio la recuperación disminuye considerablemente. El fluoruro de potasio la influencia sobre la recuperación de forma negativa; sin embargo, éste provoca disminuciones menores que las obtenidas con los reactivos mencionados anteriormente (Yépez, 2010, pp. 164- 167).

La implementación de agitación en los ensayos de fusión de limallas provoca una recuperación ligeramente mayor a la que se obtiene sin agitación a 700 °C y 750 °C. Sin embargo, al aumentar la temperatura a 800 °C y 850 °C, la diferencia de recuperaciones se vuelve mayor, esto sucede debido a que existe mayor

contribución de energía y al agitar el sistema la mezcla de sales recubren mayor cantidad de limallas (Yépez, 2010, pp. 167-172).

1.1.2.7 Escorias salinas generadas en el proceso de fusión

El producto secundario del reciclaje de aluminio son las escorias salinas. Este residuo se caracteriza por ser altamente tóxico y peligroso para el medio ambiente. Existen dos tipos de disposición de este material, el vertido y la recuperación de las escorias salinas, siendo ésta última la actividad que permite cerrar el ciclo de reciclaje, permitiendo el aprovechamiento de todos los componentes inmersos en el proceso (Arias, Fernández y Portilla, 2010, p. 244).

La composición de las escorias salinas depende de sus orígenes. Sin embargo, se puede establecer una composición distribuida de la siguiente forma: 15-30 % de óxido de aluminio, 30-55 % de NaCl, 15-30 % de KCl y 5-7 % de aluminio metálico e impurezas (carburos, nitruros, sulfuros y fosfuros) (Tsakiridis, 2012).

El tratamiento existente para las escorias salinas consiste en primer lugar, en un proceso de trituración selectivo y tamizado, de esta forma se logra obtener una fracción metálica que es enviada a procesos de fundición; la otra fracción, se trata en fase húmeda, con lo que se logra la separación de sólidos insolubles, éstos pueden ser utilizados en obras civiles, industria de la cerámica, industria metalúrgica y agricultura. La sal disuelta en la fase líquida es cristalizada y puede ser utilizada nuevamente como carga fundente en la industria secundaria del aluminio (Arias et al., 2010, p. 244-245).

1.1.3 EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA RECUPERACIÓN DE ALUMINIO MEDIANTE FUSIÓN

Los procesos de recuperación de aluminio deben evitar el contacto de la chatarra y las escorias de fundición con el oxígeno. Existen dos tipos de fusión la primera se

realiza en presencia de sales fundentes y la segunda en ausencia de las mismas. Generalmente, los hornos más utilizados en el reciclaje de aluminio con sales fundentes son el horno rotatorio, el horno de reverbero y los hornos eléctricos (Totten y MacKenzie, 2003, pp. 143, 145).

Debido a factores medio ambientales respecto a disposición de los residuos de fusión, existen procesos alternativos para la recuperación de aluminio. El principio de éstos es evitar la presencia de oxígeno dentro del horno, esto se puede lograr en hornos con calentamiento por antorcha de plasma, hornos de arco eléctrico y la fusión con mejoramiento de quema utilizando oxígeno (Totten y MacKenzie, 2003, pp. 143, 145).

1.1.3.1 Horno rotatorio

Generalmente, el reciclaje de aluminio con sales se realiza en hornos rotatorios. De esta forma se puede separar la escoria generada del aluminio metálico. El equipo consiste en un tambor de acero que incluye sistemas de muñón de alineación, cojinetes de inclinación y piñón de accionamiento. Dentro de la cámara de combustión se puede trabajar con gas natural, fuel oil o aire precalentado, de esta forma se genera una llama que calienta la materia prima cargada en el interior del horno. En la Figura 1.11, se puede observar un horno rotatorio para la recuperación de aluminio por fusión. (Boeckenhauer y Kaczmarczyk, 2008, pp. 3-4).



Figura 1.11. Esquema de un horno rotatorio en el reciclaje de aluminio
(Totten y Mackenzie, 2003, p. 127) Modificado

1.1.3.2 Horno de reverbero

En este tipo de horno, la energía se produce por quemadores que utilizan combustibles líquidos o gaseoso. El hogar de quema de combustible se encuentra en un extremo y opuesto a éste la chimenea. La llama formada incide directamente sobre la carga metálica con el fin de provocar su fusión; por tanto, la carga se calienta tanto por contacto con los gases caliente como por el calor de radiación en la bóveda (Boeckenhauer y Kaczmarczyk, 2008, pp. 4-6).

Los hornos de reverbero, se caracterizan por ser de poca altura y gran longitud. La variación en el diseño incluye la capacidad de inclinaciones, alimentación frontal o superior y la posibilidad de múltiples cámaras de combustión. Su uso esta destinado a procesamiento de desechos de aluminio a media y gran escala. En la Figura 1.12, se muestra una representación de este tipo de horno. (Boeckenhauer y Kaczmarczyk, 2008, pp. 4-6).

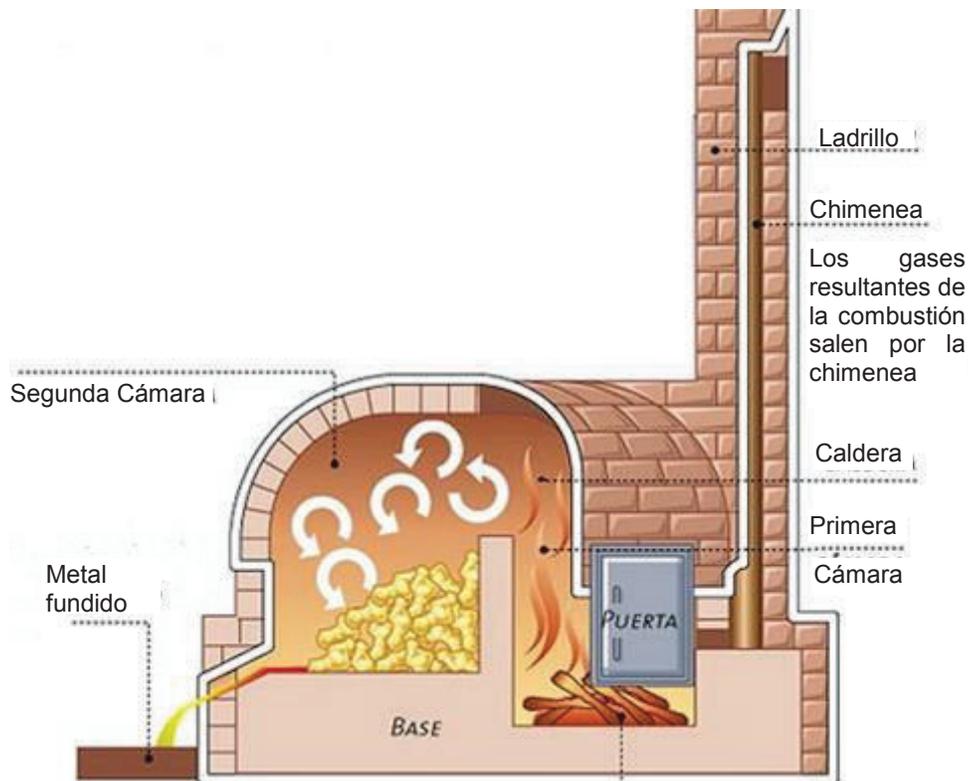


Figura 1.12. Esquema de un horno de reverbero
(Bailon, 2011) Modificado

1.1.3.3 Horno eléctrico

Los hornos eléctricos representan una alternativa para la fundición de desechos de aluminio a baja escala. Una de las ventajas de su uso es la calidad del producto recuperado, al no existir combustión en el ambiente se evita el riesgo de inclusiones en el aluminio metálico. Además, se reducen las emisiones gaseosas contaminantes. Sin embargo, los costos de electricidad son mas altos que los provocados al utilizar equipos que usan combustibles fósiles (Schlesinger, 2013, p. 170)

1.1.3.4 Fusión por antorcha de plasma

El plasma es una nube en estado gaseosa que se compone por electrones libres, iones positivos, atomos y moléculas neutras. Se genera cuando el gas tiene la suficiente energía para ionizarse. Puede ser formado con gases como nitrógeno, helio y argón o con sus mezclas. Al utilizar este tipo de tecnología se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 10 000 °C (Sánchez, Escobar, Echavarría, Ossa, y Escobar, 2007, pp. 873-876)

En la Figura 1.13, se puede observar el diagrama de un horno usando antorcha de plasma para la recuperación de aluminio.

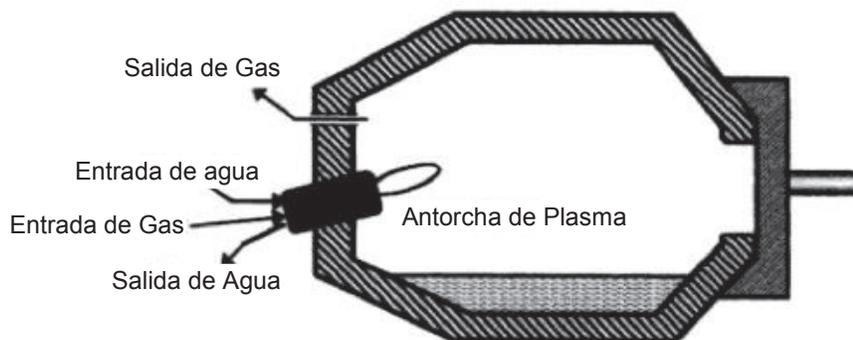


Figura 1.13. Diagrama de un horno usando antorcha de plasma
(Totten y Mackenzie, 2003, p. 145) Modificado

La ventaja de utilizar hornos de fusión por antorcha de plasma es la producción limpia además de la eficiencia de los procesos. En el caso del papel aluminio al

tener una superficie alta de contacto aumenta la eficiencia de recuperación respecto a la que se logra en hornos convencionales (Sánchez et al., 2007, pp. 873-876).

1.1.3.5 Fusión en hornos de arco eléctrico

Este tipo de horno se utiliza para procesos de fusión que requieren alta calidad, resistencia a la temperatura o inoxidable. Para esto, se aprovecha el calor que se irradia por el arco eléctrico. Una ventaja es la capacidad de control de la cantidad de oxígeno dentro de la cámara, además de la disminución en la generación de gases en comparación con otras técnicas (Rodríguez, Castro y del Real, 2006, pp. 156-157).

En la Figura 1.14, se muestra el esquema de un horno de arco eléctrico. De forma general, estos equipos se forman por un crisol de acero forrado con un material refractario, 3 electrodos de grafito, una bóveda que también es de material refractario y se sostiene por un cincho de acero (Rodríguez et al., 2006, p. 157).

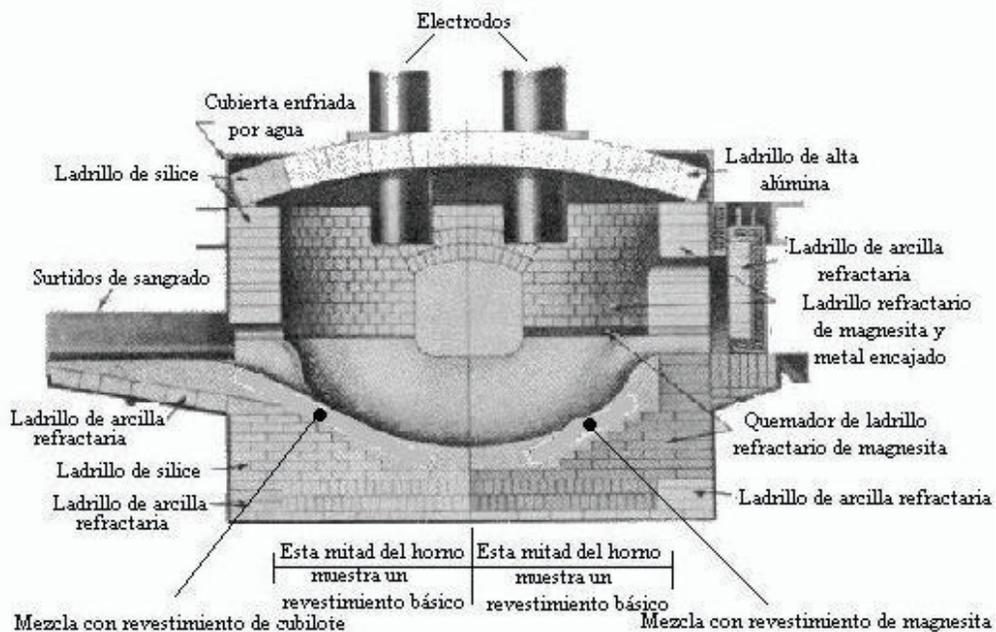


Figura 1.14. Diagrama de un horno de arco eléctrico (Rodríguez et al., 2006, p. 157)

1.1.3.6 Fusión con control de los quemadores

El proceso de fusión se realiza en forma similar al llevado a cabo en hornos rotatorios convencionales, con la diferencia de que el combustible es quemado con oxígeno y no con aire. Con esto se logra una disminución del volumen de gases generados hasta del 75 %. Además, se evidencia un aumento en la eficiencia del proceso del 5 % en la recuperación de aluminio, debido a que la ausencia de nitrógeno del aire no permite que se formen compuestos en forma de nitratos (Totten y MacKenzie, 2003, p. 146).

1.2 RECICLAJE DE EMPAQUES FARMACÉUTICOS TIPO *BLISTER*

1.2.1 EMPAQUES FARMACÉUTICOS TIPO *BLISTER*

Los empaques *blister* son un tipo de envase utilizados para contener en ellos dosis de medicamentos en forma sólida o semisólida. Dentro de un empaque *blister* se disponen varias unidades de medicamento en filas paralelas, de tal forma que, se puede obtener una dosis unitaria del producto (Arias, 1999, p. 30). En la Figura 1.15, se observa la configuración básica de los empaques tipo blíster.

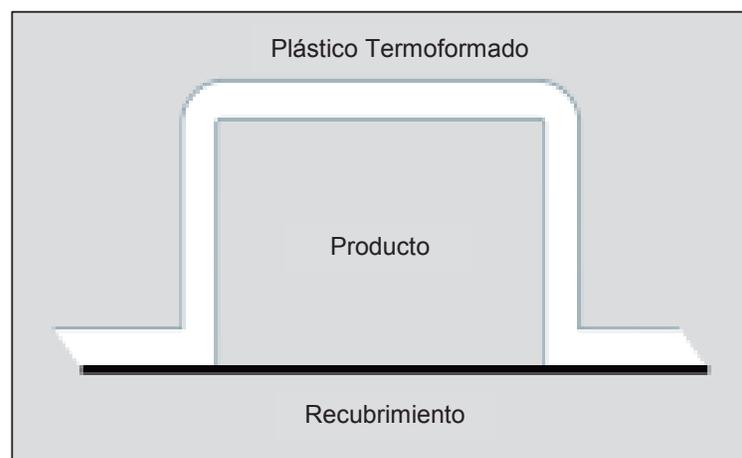


Figura 1.15. Configuración básica empaque *blister*
(Pilchik, 2000a, p. 69) Modificado

Existen dos tipos de empaques tipo *blister*. En el primer caso, la cavidad se forma por plástico termoformado y el recubrimiento se constituye por plástico o una combinación de plástico, papel y/o aluminio. En el segundo caso, tanto la cavidad como el recubrimiento son de aluminio (Pilchik, 2000a, p. 68).

1.2.2 COMPONENTES DE LOS EMPAQUES FARMACÉUTICOS TIPO *BLISTER*

Los cuatro componentes básicos de los empaques farmacéuticos tipo *blister* son el film formado, el material de cubierta, el recubrimiento de sellado térmico y la tinta de impresión. Aproximadamente el 80-85 % del blíster corresponde al film formado, mientras que el 15-20 % corresponde al material de cubierta. En la Figura 1.16, se observa los componentes básicos del empaque tipo blíster (Pilchik, 2000a, p.72).

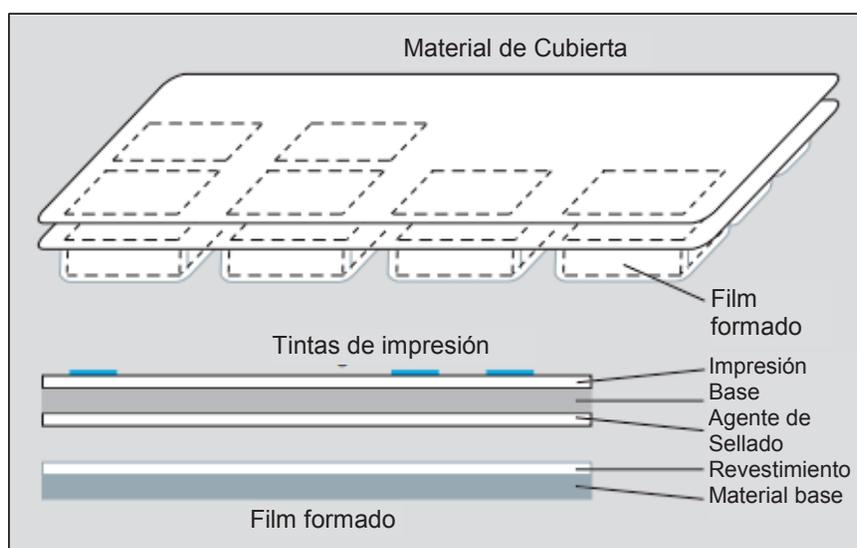


Figura 1.16. Componentes básicos del empaque *blister*
(Pilchik, 2000a, p. 72) Modificado

1.2.2.1 Film formado

Es el componente dentro del cual se aloja el producto. Una de las claves para empaquetar el producto es la selección del plástico de acuerdo a sus propiedades y grosor requerido. Los factores a considerar al seleccionar el tipo de

film son: peso y dimensiones del producto, bordes (afilados o punteagudos), resistencia al impacto, envejecimiento y costo de la película (Pilchik, 2000a, pp. 72-74)

- ***Policloruro de Vinilo (PVC)***

Llamado PVC rígido debido a la ausencia de agentes suavizantes. Es un material claro, con excelente termoformabilidad, alta resistencia química y a la flexión, baja permeabilidad a aceites, grasas e ingredientes aromatizantes. Además, dentro del mercado presenta un bajo costo. Las características del PVC hacen que sea el material de elección para el embalaje de empaques tipo *blister* (Pilchik, 2000a, pp. 72-74).

- ***Policloruro de Vinilo/Cloruro de Polivinilideno (PVC/PVDC)***

El volumen de envases envases de medicamentos que utiliza este tipo de film es pequeño. Sin embargo, juega un papel crítico en envases laminados con revestimientos de PVC. La ventaja de este material es que puede reducir el gas y la humedad de los empaques en comparación con la que presenta el PVC rígido solo (Pilchik, 2000a, pp. 72-74).

- ***Policloruro de Vinilo/Clorotrifluoroetileno (PVC/CTFE)***

Las películas que usan una combinación de PVC con CTFE tienen la permeabilidad al vapor de agua más bajo de todas las películas utilizadas en empaques. Dicho valor se reduce en un factor de 15; sin embargo, las complicaciones ambientales del PVC también se aplican para este tipo de películas (Pilchik, 2000a, pp. 72-74).

- ***Polipropileno (PP)***

El uso de PP muestra una tendencia creciente para paquetes de tipo ampolla. Entre las ventajas se tiene la facilidad para reciclar, no se liberan toxinas en tratamiento de incineración y buenas propiedades de barrera a la humedad. Sin embargo,

presenta mayor permeabilidad al vapor de agua respecto a la del PVC. Además, presenta inestabilidad térmica, deformaciones y susceptibilidad a la contracción (Pilchik, 2000a, pp. 72-74).

- ***Tereftalato de polietileno (PET)***

Es otro material que pueda sustituir al PVC. Sin embargo, debido a su relativamente alta permeabilidad al vapor de agua en comparación con la de PVC impide su uso universal (Pilchik, 2000a, pp. 72-74).

- ***Poliestireno (PS)***

Tiene características positivas en el proceso de termoformado, pero su alta permeabilidad hace que el uso no sea adecuado como componente de *blíster* en uso farmacéutico (Pilchik, 2000a, pp. 72-74).

1.2.2.2 Material de cubierta

Este componente proporciona la base estructural sobre la que se construye el paquete *blíster*. Su selección depende del tamaño, forma y peso del producto. Generalmente el grosor varía de 0,36 – 0,76 mm. El material de cubierta en los envases farmacéuticos suele ser una lámina de papel aluminio o una combinación de papel/aluminio o a su vez papel/PET/aluminio. Su elección depende directamente de la tasa de transferencia de vapor de agua, que debe ser tan baja como la del film formado para preservar el producto del interior. (Pilchik, 2000a, p. 76).

Las láminas de aluminio, son el material de cubierta más utilizado para empaques tipo *blíster*. Generalmente, su espesor es de 0,6 milésimas de pulgada. La dureza de la lámina facilita la apertura al producto. Se puede imprimir sobre él para la identificación del medicamento que se aloja en su interior (Pilchik, 2000a, p. 76).

Otra alternativa es un producto conformado por papel y láminas de aluminio. La combinación de estos dos materiales hacen que el espesor de la capa film sea de 0,6 a 1 milésima de pulgada. La lámina de aluminio debe ser relativamente delgada para incrementar la dificultad para la apertura del producto (Pilchik, 2000a, p. 76).

Finalmente, en ciertos casos se utiliza una combinación de papel, plástico y aluminio. El concepto del uso de este tipo de material es que primero se retire el papel, después el laminado PET y finalmente el papel aluminio (Pilchik, 2000a, p. 76).

1.2.2.3 Recubrimiento de sellado térmico

El recubrimiento de sellado térmico es probablemente el componente más crítico de todo el sistema. La integridad física y el aspecto del envase depende de la calidad del proceso de sellado por calor. Estos recubrimientos a base de agua o solventes permiten la unión entre el material de cubierta y el film formado (Pilchik, 2000a, p. 76).

Las características principales de un recubrimiento de sellado por calor exitoso son: buen brillo, claridad, resistencia a la abrasión y la pegajosidad en caliente, y debe sellar a diversas películas *blíster*. Además, debe resistir condiciones climáticas no favorables (Pilchik, 2000a, p. 76).

1.2.2.4 Tintas de impresión

Las tintas de impresión permiten exponer gráficos y textos, que permiten la identificación del producto además de un atractivo estético. Se aplican al material de cubierta mediante procesos de tipografía, huecograbado, o de impresión de pantalla de seda. Las tintas deben resistir temperaturas de termosellado de hasta 300 °C, sin exponer cualquier decoloración o pegajosidad. Además, deben cumplir con propiedades de resistencia a la abrasión, flexión y decoloración. Finalmente,

no deben contener cantidades excesivas de lubricantes de hidrocarburos, grasas y aceites (Pilchik, 2000a, p. 78).

1.2.3 PROCESO DE ELABORACIÓN DE EMPAQUES TIPO *BLISTER*

La elaboración de empaques tipo *blister* consiste en un proceso continuo mediante el cual se logra empaquetar un producto dentro de un envase. Incluye actividades de termoformado de la cavidad, llenado de la cavidad con una tableta, sellado de la ampolla e impresión en el material de cubierta (Al-Achi, Craig y Ram, 2013, p. 291). En la figura 1.17, se muestra un diagrama de ensamble de empaques tipo *blister*.

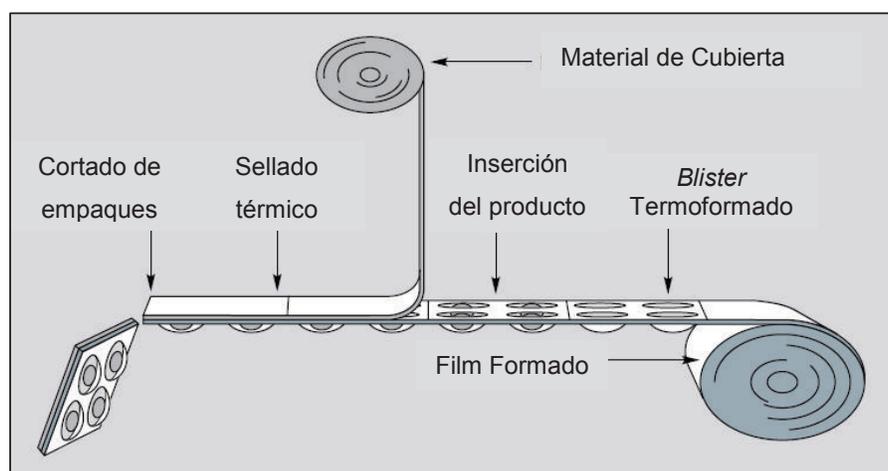


Figura 1.17. Diagrama de ensamble de empaques tipo *blister*
(Pilchik, 2000b, p. 69) Modificado

El material de cubierta y el film formado son suministrados en rollos, de acuerdo a la demanda de producción. Para el proceso de termoformado, el film es calentado hasta alcanzar una temperatura que permita la formación de las cavidades, esta temperatura depende del tipo de material polimérico usado. En el caso del PVC, éste debe ser calentado de 120 a 140°C. Una vez que la cavidad ha sido formada, el material pasa a la estación de enfriamiento para que la misma mantenga la forma dada. Después, dentro de la cavidad se inserta la tableta. Si el material de cubierta utilizado es aluminio, el sellado térmico es realizado bajo presión. Una vez que se

ha producido la unión de los dos materiales los empaques pasan a la zona de cortado (Al-Achi et al., 2013, p. 291).

Este proceso de ensamblado requiere presiones relativamente bajas, por lo que los moldes para formar las cavidades pueden fabricarse de forma rápida y de materiales fáciles de adquirir. Además, debido al espesor reducido de las piezas el tiempo de procesado es corto. Como consecuencia de esto, se tiene bajos costos en la fabricación de envases tipo blister (Guilcamaigua, 2013, p. 4).

1.2.4 MÉTODOS DE RECICLAJE DE EMPAQUES TIPO *BLISTER*

La problemática de reciclaje de los empaques tipo *blister* radica en los inconvenientes de tratamiento por incineración del PVC presente en el envase. Durante los procesos de incineración de PVC se genera dioxinas, razón por la cual el uso de este tipo de material plástico ha sido cuestionado durante los últimos años.

La generación de este tipo de compuestos son considerados una amenaza tanto para la salud humana como para el medio ambiente por lo cual es necesario establecer una prevención de contaminación reduciendo la práctica de este tipo de procesos (Belliveau, 2003, p. 1).

Existen dos procesos orientados al tratamiento de productos que incluyen PVC en su composición. La recuperación de PVC de materiales compuestos, realizado mediante el proceso Vinyloop y la combustión en dos etapas del material con PVC con recuperación de HCl (VinyLoop, 2013; Saeed, 2004, pp. 14-15).

1.2.4.1 Recuperación de PVC de materiales compuestos (Proceso Vinyloop)

Este proceso fue desarrollado por la compañía Solvay S.A.; Vinyloop® es una tecnología desarrollada para reciclar residuos de PVC debido a la dificultad de su

tratamiento. Mediante esta metodología se produce un compuesto de PVC reciclado de alta calidad (VinyLoop, 2013).

El proceso de recuperación de PVC consta de 6 operaciones. En primer lugar, el material de reciclaje recibido es enviado a una etapa de pretratamiento, en la cual es limpiado y reducido de tamaño mediante molinos. Después, se procede a realizar una disolución con el uso de un solvente que actúa sobre el PVC y sus aditivos, éste no tiene efecto sobre otros materiales contaminantes. El material que no se ha disuelto es separado mediante procesos de decantación, filtración o sedimentación dependiendo de su naturaleza y es sometido a procesos de lavado con agua caliente para la eliminación de PVC residual. La mezcla de PVC y solvente se logra separar por precipitación, es posible añadir aditivos para determinar las características del producto final, según los requerimientos. El solvente es recuperado por evaporación y puede ser reciclado dentro del proceso. Finalmente, la suspensión de PVC se somete a un proceso de filtrado y posteriormente secado. El producto final es PVC reciclado que puede disponerse como materia prima para otros procesos (Vinyloop, 2007). En la Figura 1.18, se muestra el diagrama del proceso Vinyloop.

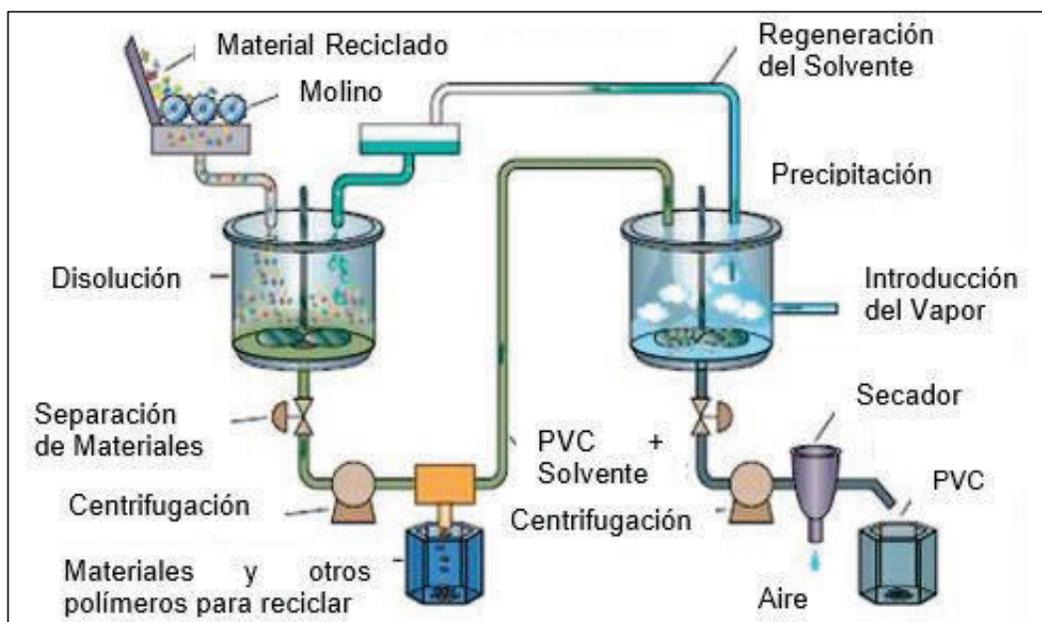


Figura 1.18. Diagrama del proceso Vinyloop
(Cabrera, 2012, p.46) Modificado

1.2.4.2 Combustión en dos etapas del material con PVC con recuperación de HCl

El proceso consiste en una combustión de dos etapas para los residuos sólidos que contienen una fracción significativa de PVC. Este compuesto presenta problemas en la operación de incineradores, gasificadores y combustores debido a que su comportamiento es diferente al de otros materiales plásticos.

En la Figura 1.19, se puede observar un diagrama del proceso. Los residuos se alimentan al primer reactor de lecho fluidizado operado con nitrógeno con el fin de evitar la formación de dioxinas y furanos. La mezcla se calienta hasta 350°C , en este proceso se logra liberar la mayor cantidad de cloro en forma de cloruro de hidrógeno (HCl). El producto gaseoso del reactor se constituye principalmente N_2 , HCl y H_2O . El producto sólido pasa al segundo reactor, un combustor de lecho fluidizado circulante. En éste, se alcanzan temperaturas de 800 a 850°C , de esta forma el residuo sólido es quemado sin provocar problemas de corrosión a los equipos y peligros medio ambientales (Saeed, 2004, pp. 14-15).

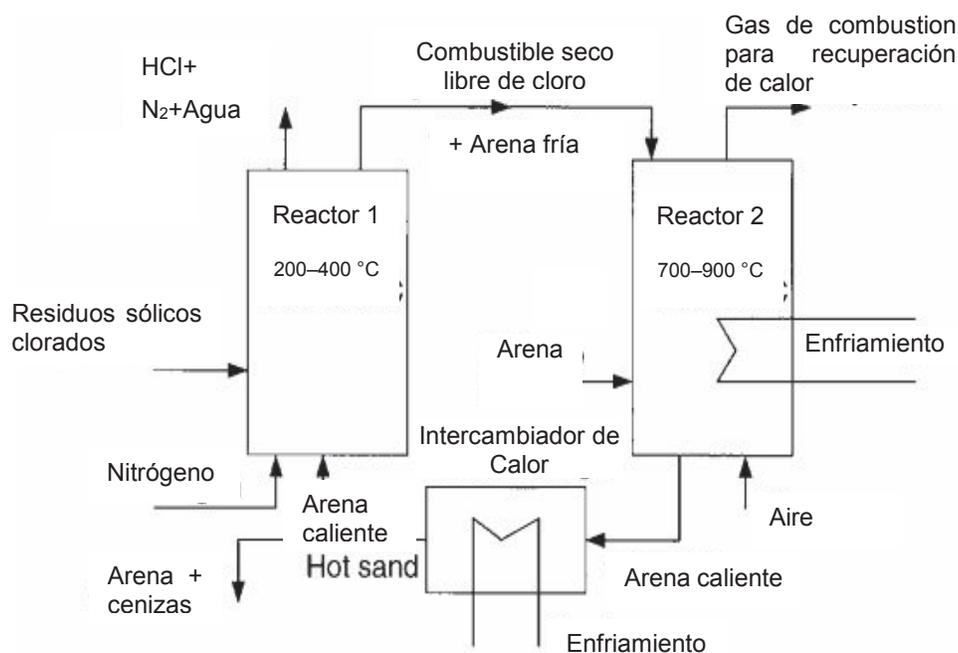


Figura 1.19. Diagrama del proceso de combustión de PVC en dos etapas (Saeed, 2004, p.15)

Durante el proceso ocurren dos reacciones químicas. La ecuación 1.1, describe el proceso a baja temperatura; mientras que, la ecuación 1.2, describe el proceso a alta temperatura.



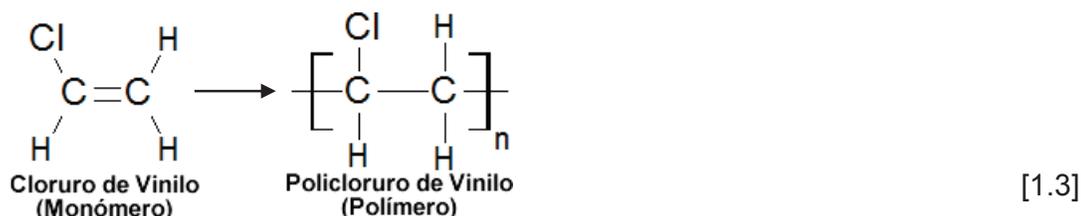
La ventaja de este tipo de proceso es el tipo de residuo que se genera, no hay gases calientes de HCl que tengan que ser manejados. Además, la eficiencia térmica del proceso es de aproximadamente el 36 %, dependiendo del contenido de PVC de los residuos y la temperatura de trabajo.

La recuperación de HCl puede ser mayor al 90 % con temperaturas de trabajo de 310°C. Sin embargo, los diferentes tipos de PVC y sus características, pueden presentar implicaciones en el proceso de combustión en dos etapas, modificando los resultados obtenidos (Zeverhoven y Saeed, 2000, pp. 2, 6).

1.2.5 LIXIVIACIÓN DE PVC CON SOLVENTES ORGÁNICOS

1.2.5.1 Policloruro de vinilo (PVC)

El PVC es un material polimérico que pertenece al grupo de los termoplásticos, es decir al ser calentado pasa a un estado viscoso que hace que reblandezca y permita su deformación y al ser enfriado mantiene la consistencia inicial. Es el producto de una reacción de polimerización por adición del monómero cloruro de vinilo (Groover, 1997, pp. 203-204; UCA, 2008, pp. 1-4).



Existen dos tipos de PVC:

- **PVC Rígido:** Se forma por resina de PVC en combinación con aditivos, en su estructura no contienen sustancias plastificantes lo que le da alta resistencia al impacto y dureza. Sus principales aplicaciones son la fabricación de envases, botellas, perfiles, tuberías, empaques tipo *blister*, etc.
- **PVC Flexible:** Se forma por resina de PVC en combinación con aditivos y plastificantes. Sus principales aplicaciones son en cables, laminación, mangueras, calzado, tapicería, etc.

Las principales características del PVC son principalmente la elevada resistencia química (sustancias altamente alcalinas y ácidas), resistencia a la corrosión y al ataque biológico. Una de las ventajas técnicas es la fortaleza a la abrasión, resistencia mecánica y al impacto. Presenta impermeabilidad a gases y a líquidos, es resistente al fuego y actúa como producto inerte e inocuo. Las propiedades del PVC varían de acuerdo a la proporción de aditivos y plastificantes que posean, lo que lo convierte en un material muy versátil dentro de la industria. Finalmente, el bajo costo de este material hace que sea ampliamente utilizado. En la Tabla 1.2, se muestra las principales propiedades del PVC sin plastificante (Groover, 1997, pp. 203-204; UCA, 2008, pp. 1-4).

Tabla 1.2. Propiedades del PVC sin plastificante

Propiedad	Unidades	Valor
Densidad (20°C)	1,4	g/cm ³
Módulo de elasticidad	2800	MPa
Resistencia a la tensión	40	MPa
Elongación	2	%
Temperatura de transición vítrea	81	° C
Temperatura de fusión	212	° C

(Groover, 1997, p. 204)

1.2.5.2 Disolventes orgánicos

Los disolventes orgánicos son compuestos químicos que se utilizan para disolver, diluir y extraer ciertas sustancias, dependiendo de su afinidad. En la mayoría de los casos son líquidos, pero también existen disolventes en estado de gas o como fluido supercrítico. Generalmente se utilizan estas sustancias en solución con otros solventes; sin embargo, hay ocasiones en las que se utiliza el disolvente puro. La clasificación habitual de estas sustancias es de acuerdo a la naturaleza orgánica o inorgánica de las sustancias y la familia a la que pertenecen. En la Tabla 1.3, se muestra una clasificación de los disolventes más comunes (Gadea, Romano y Santos, 2006, pp. 9-10).

Tabla 1.3. Clasificación de los disolventes

	Familia	Ejemplos
Orgánicos	Hidrocarburos aromáticos	Benceno, tolueno, xileno, cumeno, etilbenceno.
	Hidrocarburos alifáticos	Pentano, hexano, heptano.
	Hidrocarburos alicíclicos	Ciclohexano, metilciclohexano, terpenos.
	Hidrocarburos alogenados	Tricloroetileno, percloroetileno, tetracloruro de carbono
	Alcoholes	Metanol, etanol, isopropanol.
	Cetonas	Acetona, metiletilcetona.
	Ésteres	Acetato de etilo, acetato de metilo, acetato de n-butilo.
	Ácidos orgánicos	Ácido acético, ácido oxálico.
Inorgánicos	Álcalis	Hidróxido de sodio, carbonato de sodio, fosfato de sodio, amoníaco.
	Ácidos minerales	Ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido nítrico.

(Gadea et al., 2008, p. 10)

- **Acetona**

Es la cetona más sencilla y por ende la más importante del grupo de las alifáticas. Se obtiene mediante deshidrogenación de isopropanol, oxidación directa de

propeno o la coproducción en el proceso de obtención de fenol. Es un líquido incoloro, altamente inflamable, volátil y de olor característico agradable. Sus principales aplicaciones son como disolvente de grasas, ceras, plásticos, lacas y barnices. Además es utilizado para manufacturar explosivos, películas fotográficas, purificación de parafinas, elaboración de removedores de pintura, etc. (Weissermel y Arpe, 1981, p. 260). La hoja de seguridad de la acetona se muestra en el Anexo I.

- *Acetato de n-butilo*

Es un éster que se utiliza principalmente como disolvente para pinturas y resinas. Es un líquido incoloro y transparente, posee un olor frutal característico. Se obtiene por esterificación directa del ácido acético con alcohol butílico en presencia de un catalizador. Posee la ventaja de ser relativamente poco tóxico. Puede asociarse a otros solventes para ralentizar su acción. (Weissermel y Arpe, 1981, p.260). La hoja de seguridad del acetato de n-butilo se muestra en el Anexo II.

1.2.5.3 Criterios de solubilidad para polímeros

La solubilidad de los materiales poliméricos es más compleja que la de los compuestos de bajo peso molecular y depende de las características tanto del disolvente como de la naturaleza del polímero (González, 1997, p. 66).

El proceso de disolución de un polímero se realiza en dos fases y se caracteriza por ser lento. En la primera fase, las moléculas del disolvente se funden dentro de las moléculas del polímero, lo que produce un residuo con apariencia de gel hinchado, el grado de hinchamiento del polímero depende de las propiedades de cada sistema y la interacción entre las sustancias. La segunda fase, es propiamente la disolución del polímero en el disolvente, ocurre solamente si existen interacciones intensas entre polímero-disolvente (Billmeyer, 1975, pp. 23-24).

Existen dos factores determinantes en el proceso de disolución, la naturaleza del disolvente y la temperatura de trabajo, los cuales pueden provocar o en su caso evitar la solubilidad de un polímero. Además, la topología del polímero es muy importante para determinar su solubilidad (Billmeyer, 1975, pp. 23-24).

El aumento de la temperatura, en la mayoría de los casos, favorece al factor solubilidad. Al disminuir la temperatura, la termodinámica del sistema hace que el solvente y el polímero no sean miscibles en ninguna proporción (González, 1997, pp. 70,74).

Los polímeros reticulados no se disuelven, solamente se hinchan. En ejemplo de esto son los cauchos que únicamente presenta un grado de hinchamiento pero no de disolución. Las fuerzas intermoleculares de los polímeros que presentan cristalinidad, dificultan la solubilidad a temperatura ambiente; sin embargo, al trabajar a temperaturas cercanas al punto de fusión se logra la disolución de los mismos (Billmeyer, 1975, pp. 23-24).

Los parámetros de solubilidad son herramientas que permiten predecir el grado de interacción de dos materiales, éste se define como la raíz cuadrada de la densidad de energía cohesiva de un compuesto. En la ecuación 1.8, se puede observar los términos que intervienen en el cálculo de dicho parámetro. Existen parámetros establecidos de solubilidad (δ) de los componentes que permiten determinar la interacción entre el solvente y el polímero, si la diferencia entre estos valores es menor que 1 (cal/cm^3)^{1/2}, significa que se efectuará el proceso de solubilidad. (González, 1997, pp. 70-72).

$$\delta = \left(\frac{\Delta E}{V} \right)^{1/2} \quad [1.4]$$

Donde:

δ : Parámetro de solubilidad

ΔE : Energía cohesiva molar (energía de vaporización)

V : Volumen molar

En la Tabla 1.4, se presentan valores de δ para algunos disolventes comunes (González, 1997, pp. 70-72).

Tabla 1.4. Parámetros de solubilidad para disolventes (δ_1)

Disolvente	δ (cal/cm^3) ^{1/2}
Ciclohexano	8,2
Tetracloruro de carbono	8,6
Tolueno	8,9
Acetato de etilo	9,0
Acetona	9,9
Metanol	14,5

(González, 1997, p.72)

En la Tabla 1.5, se presentan valores de δ para los polímeros más comunes (González, 1997, pp. 70-72).

Tabla 1.5. Parámetros de solubilidad para polímeros (δ_2)

Polímero	δ (cal/cm^3) ^{1/2}
Polietileno	7,9
Poliestireno	9,1
Polibutadieno	8,4
Policloruro de vinilo	9,6
Acetato de celulosa	10,6
Nailon 66	13,6

(González, 1997, p. 72)

Solubilidad del PVC

El PVC a temperatura normal es resistente a ácidos, álcalis y sales corrientes. Sin embargo, al entrar en contacto con algunos disolventes como el benceno y la

acetona, es atacado y como producto se tiene el material hinchado o esponjado (Nutsch, 2000, p. 82).

Los parámetros de solubilidad para la acetona y el PVC son $9,9 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ y $9,6 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$, respectivamente. Es decir de acuerdo al análisis presentado anteriormente, al tener una diferencia de $0,3 \text{ (cal/cm}^3)^{1/2}$ se muestra que son totalmente miscibles (González, 1997, pp. 70-72).

Los materiales rígidos de PVC al tener contacto con hidrocarburos aromáticos y clorados, cetonas, ésteres, esteres cíclicos, penetran en su estructura causando inflamación y reblandecimiento. La solubilidad es dependiente directa de la concentración del disolvente (González, 1997, pp. 70-72).

En la Tabla 1.6, se muestra la tendencia de solubilidad de PVC con diferentes disolventes orgánicos tomando en cuenta los parámetros concentración y temperatura.

Tabla 1.6. Resistencia química de PVC a diferentes solventes.

Disolvente	Concentración	Temperatura °C	Resistencia Química
Ácido acético	Técnicamente puro	20	0
		40	-
Acetona	Técnicamente puro	20	-
		40	-
Etanol	96 %, técnicamente puro	20	+
		40	+
Hexano	Técnicamente puro	20	+
Metil etil cetona	Técnicamente puro	20	-
Xileno	Técnicamente puro	20	-

(+ Resistente, 0 Parcialmente resistente, - No resistente)

2. PARTE EXPERIMENTAL

En el presente trabajo se realizó el diseño de una planta para la recuperación de aluminio de empaques tipo *blister* usados por la industria farmacéutica, mediante procesos de lixiviación y fusión.

Se utilizaron empaques farmacéuticos tipo *blister* recolectados en la ciudad de Quito. Se obtuvo aproximadamente 20 kg de empaques. El material fue caracterizado química, física y mineralógicamente.

Con el objetivo de separar los componentes del empaque (material polimérico y lámina metálica), se realizaron ensayos de lixiviación utilizando solventes orgánicos, variando parámetros de concentración y tiempo. De esta forma se pudo evaluar las mejores condiciones de trabajo para este proceso.

Una vez que se obtuvieron las láminas de aluminio, se realizó una compactación de las mismas y se sometieron a ensayos de fusión. Los parámetros que se mantuvieron constantes fueron: la cantidad de aluminio y el tipo de horno; mientras que, los parámetros variables fueron: la composición de las sales en la carga fundente, temperatura, tiempo, porcentaje de carga fundente y la adición de fluoruro de sodio.

Estos ensayos permitieron determinar las condiciones óptimas de obtención de aluminio metálico. Posteriormente, se realizó una caracterización del producto.

Finalmente, los datos experimentales permitieron realizar el diseño para el procesamiento de 5 t de empaques farmacéuticos al mes. Además, se realizó un análisis de pre-factibilidad económica.

En la Figura 2.1, se presenta un esquema de la metodología experimental realizada en el proyecto.

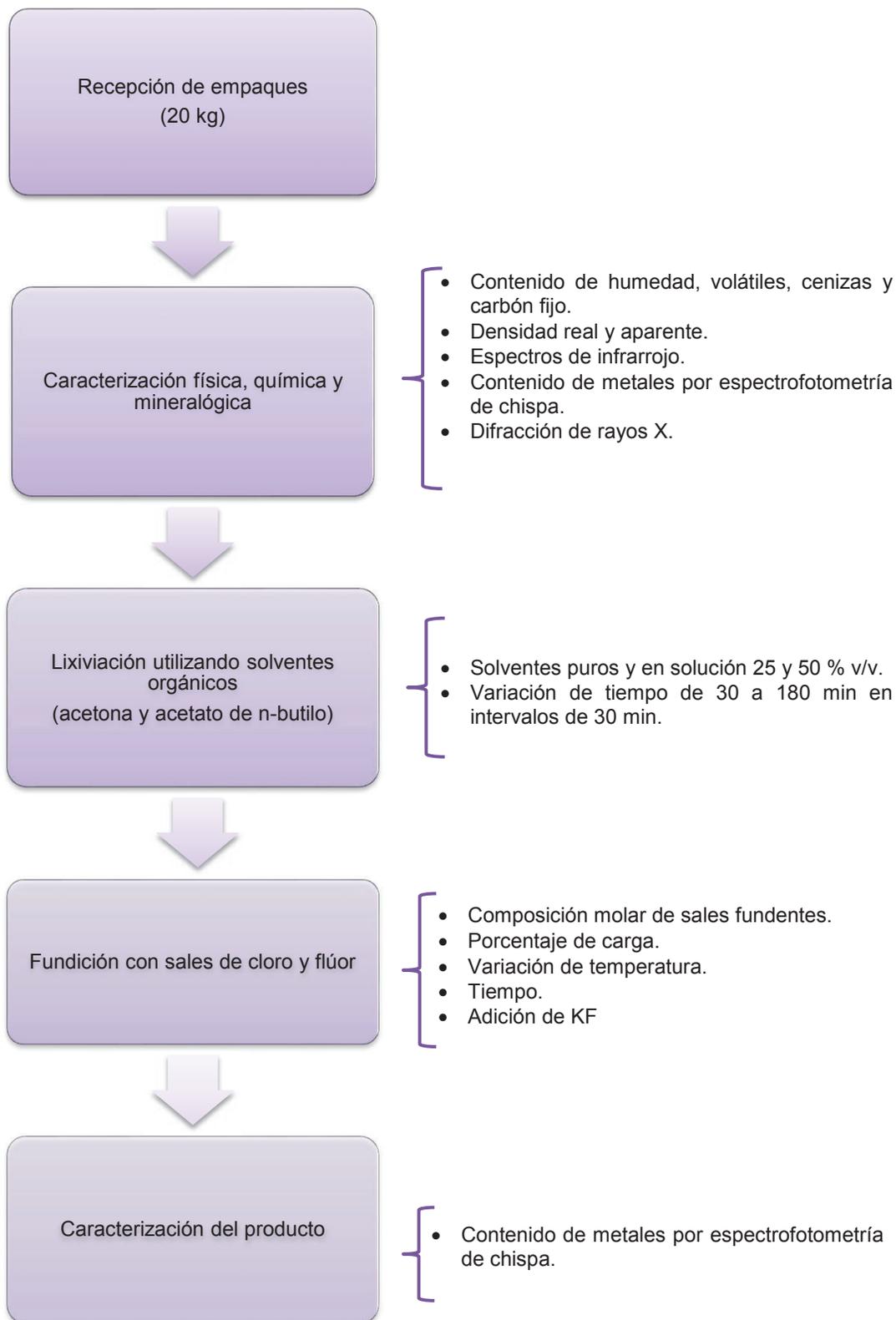


Figura 2.1. Esquema de la metodología experimental realizada.

2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LOS EMPAQUES USADOS POR LA INDUSTRIA FARMACÉUTICA

2.1.1 CARACTERIZACION FÍSICA DE LOS EMPAQUES FARMACÉUTICOS

En la caracterización física de los empaques farmacéuticos tipo *blister*, se determinó el contenido de humedad, volátiles, cenizas y carbón fijo. Para esto se utilizó los procedimientos basados en las normas ASTM D3173-87, ASTM D3174- 12 y ASTM D3175-02 (Anexo III). La caracterización del material polimérico se realizó por espectros de infrarrojo en el equipo SpectrumOne marca Perkin Elmer. Finalmente, se determinó la densidad real y aparente de los empaques tipo *blister* (Anexo III).

2.1.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS EMPAQUES FARMACÉUTICOS

2.1.2.1 Caracterización química de la lámina metálica de los empaques farmacéuticos tipo *blister*

Para la caracterización química de la lámina metálica de los empaques farmacéuticos tipo *blister*, se extrajo manualmente pedazos de 2 cm. El análisis se realizó mediante espectrofotometría de chispa en el equipo Bruker Q4 TASMAN en el laboratorio del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional.

2.1.2.2 Caracterización química del material polimérico de los empaques farmacéuticos tipo *blister*

Para caracterizar el material plástico presente en los empaques tipo *blister* se retiró manualmente la parte metálica del mismo. El film plástico fue laminado en una

prensa marca CAEVER, modelo 2112-104 a 150 °C bajo una presión de 20000 lb/plg². Mediante el uso de un Espectrofotómetro de Infrarrojo por Transformadas de Fourier marca Perkin Elmer, modelo SpectrumOne, se corrió el espectro de la muestra por el método de transmitancia. El ensayo se realizó en el laboratorio del Centro de Investigación Aplicada a Polímeros de la Escuela Politécnica Nacional.

2.1.3 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LOS EMPAQUES FARMACÉUTICOS

La caracterización mineralógica de la parte metálica de los empaques farmacéuticos tipo *blister* se realizó con el fin de determinar la naturaleza de los compuestos que lo forman. El análisis se realizó mediante difracción de rayos X (DRX) en el equipo D8 Advance Bruker en el laboratorio del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional. La cualificación y cuantificación de cada uno de los compuestos presentes en la muestra se determinó mediante el uso de los softwares EVA y TOPAS, respectivamente.

2.2 DEFINICIÓN DE LAS MEJORES CONDICIONES DE LIXIVIACIÓN UTILIZANDO SOLVENTES ORGÁNICOS (ACETONA Y ACETATO DE N-BUTILO)

La metodología de lixiviación se estableció con base en el trabajo realizado por Estrella (2013). Los ensayos de lixiviación se realizaron con la finalidad de separar los componentes del empaque tipo *blister* (el material polimérico de la lámina de aluminio). Se utilizó un equipo de extracción soxhlet de marca Selecta con disponibilidad de 6 dispositivos con capacidad de solvente de 250 mL cada uno del laboratorio de Operaciones Unitarias del Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional. En la Figura 2.2, se observa un diagrama del equipo utilizado.

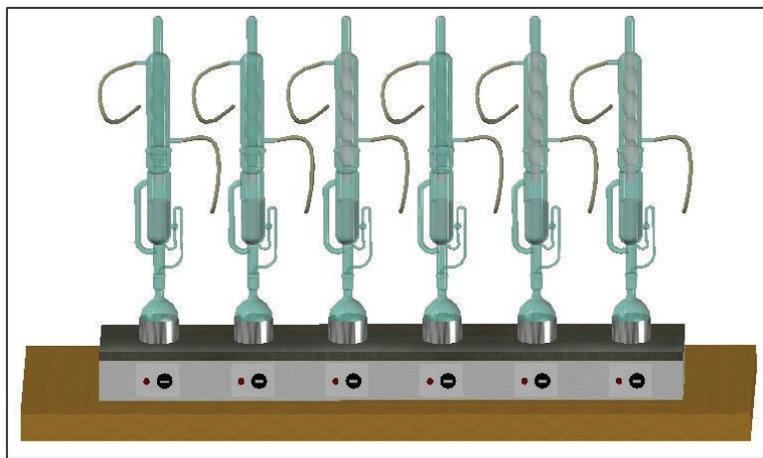


Figura 2.2. Diagrama del equipo de extracción soxhlet marca Selecta

Los ensayos se realizaron con acetona y acetato de n-butilo puros y en solución con etanol al 25 % v/v y 50 % v/v, un total de 6 ensayos por concentración de solvente. Se mantuvieron parámetros constantes: cantidad de solvente, cantidad de material y temperatura de trabajo (correspondiente a la temperatura de ebullición de cada uno de los solventes). Los parámetros variables fueron la concentración del solvente y el tiempo de lixiviación.

Para cada uno de los ensayos se tomó 4 g de empaques tipo *blister*, previamente cortados en cuadrados de aproximadamente 2 cm para permitir el manejo dentro del equipo. Éstos fueron introducidos en cartuchos de celulosa, como se observa en la Figura 2.3.

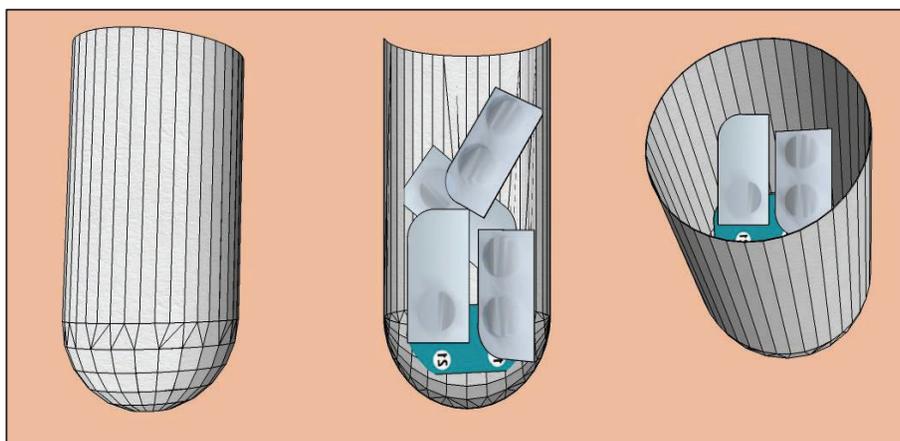


Figura 2.3. Cartucho de celulosa con material tipo *blister*

Cada uno de los balones fue llenado con 200 mL de solvente. Se prendió el equipo hasta llegar a la temperatura de ebullición del solvente y a partir de la primera gota de destilado se toma el tiempo de lixiviación. La extracción se realizó durante 30, 60, 90, 120, 150 y 180 min.

Una vez que ha concluido el proceso de lixiviación se apagó la fuente de calentamiento. Una vez que se enfrió el equipo, para evitar pérdidas de solvente por evaporación, se extrae el material remanente en los cartucho de celulosa. Las láminas se someten a un lavado con alcohol etílico para eliminar el material polimérico que pudo adherirse por proceso de enfriamiento.

Una vez que el cartucho de celulosa fue retirado, se procedió a realizar la recuperación del solvente dentro del equipo de extracción soxhlet. Aprovechando la diferencia de puntos de ebullición del material polimérico y el solvente, mediante un proceso de destilación, se recuperó el solvente, el mismo que fue reutilizado en nuevos ensayos.

Las láminas de aluminio recuperadas por lixiviación se analizaron químicamente, mediante espectrofotometría de chispa en el equipo Bruker Q4 TASMAN y mineralógicamente mediante difracción de rayos X (DRX) en el equipo D8 Advance Bruker, la cualificación y cuantificación de cada uno de los compuestos presentes en la muestra se determinó mediante el uso de los softwares EVA y TOPAS, respectivamente. Los análisis fueron realizados en el laboratorio del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional.

Finalmente, se realizó una comparación técnica de los resultados obtenidos anteriormente. Esta comparación incluyó datos de tiempo de lixiviación y eficiencia de separación de la capa metálica del material polimérico, con el fin de establecer los parámetros de lixiviación para la etapa de diseño. La eficiencia de separación se determina mediante el cálculo de la pérdida de masa del empaque farmacéutico tipo *blister*, utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Pérdida de masa} = \left(1 - \frac{m_{fblistier}}{m_{iblistier}}\right) \times 100 \% \quad [2.1]$$

Donde:

$m_{fblistier}$: Masa final del empaque tipo *blister* (g).

$m_{iblistier}$: Masa inicial del empaque tipo *blister* (g).

2.3 DEFINICIÓN DE LAS MEJORES CONDICIONES DEL PROCESO DE FUSIÓN UTILIZANDO SALES DE CLORO Y FLÚOR

La metodología de fusión que se realizó fue establecida con base en el trabajo realizado por Yépez (2010) y Estrella (2013), para la evaluación de los parámetros de recuperación de aluminio.

Los ensayos de fundición de las láminas de aluminio previamente recuperadas por lixiviación, se realizaron en una mufla eléctrica marca Lindberg/Blue M modelo BF51728C-1 de 0,064 m³ de capacidad. En la Figura 2.4, se muestra un diagrama del equipo utilizado.

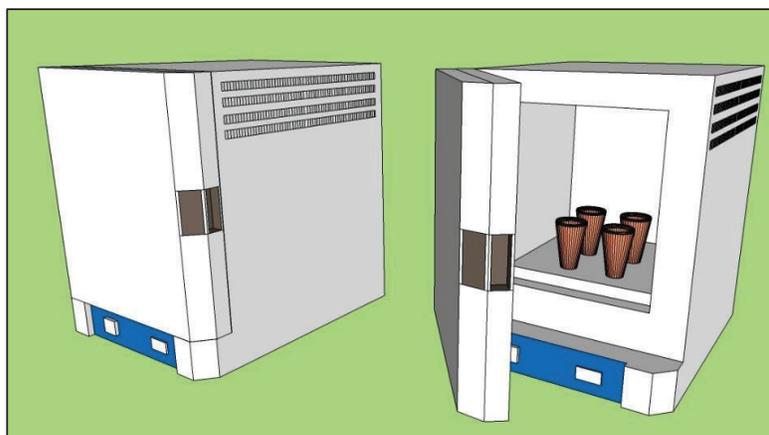


Figura 2.4. Diagrama del equipo utilizado para los ensayos de fusión de láminas de aluminio

Previo al proceso de fundición, las láminas de aluminio fueron sometidas a un proceso de compactación en una prensa hidráulica (400 kg/cm²). Para cada ensayo de fusión se tomaron 2 g de láminas compactadas, los mismo que fueron colocados dentro de un crisol de barro.

Se definió las mejores condiciones de fusión sobre la recuperación de aluminio variando la composición molar de sales fundentes, porcentaje de carga, variación de temperatura y tiempo.

2.3.1 CONCENTRACIÓN DE LAS SALES DENTRO DE LA CARGA FUNDENTE

El primer parámetro que se definió para la fusión de láminas de aluminio fue la concentración de cada sal de cloro en la mezcla fundente.

Para esto se varió la composición molar de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl), como se muestra en la Tabla 2.1. Los ensayos se realizaron durante 2 h a una temperatura de 750 °C y con el 200 % de carga fundente.

Tabla 2.1. Variación de la composición molar de las sales NaCl y KCl en los ensayos de fusión

Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
NaCl	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
KCl	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

La carga fundente que reportó mayor recuperación de aluminio fue utilizada para los ensayos posteriores.

2.3.2 EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARGA FUNDENTE NECESARIO

Con el fin de establecer el porcentaje de carga fundente adecuado para la fusión, se realizaron cuatro ensayos. Se trabajó con porcentajes de 100, 200, 300 y 400 % de carga fundente. Además, se evaluó el proceso sin tomar en cuenta una carga fundente. La variación del porcentaje de la carga fundente de los ensayos de fundición de láminas de aluminio se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Variación del porcentaje de carga fundente necesario en los ensayos de fusión

Ensayo	1	2	3	4	5
% Carga fundente	0	100	200	300	400

Para estos ensayos se mantuvieron constantes los parámetros de tiempo (2 h), temperatura (750 °C), composición de las sales (definida en el punto 2.3.1).

Se usan valores de porcentaje de carga tan elevados ya que es necesario cubrir todo el aluminio compactado, debido a la naturaleza reactiva de éste. La cantidad de carga fundente que reportó mayores valores de recuperación fue utilizada en los ensayos posteriores.

2.3.3 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA

La determinación de la influencia de la variación de la temperatura se realizó manteniendo constantes los parámetros de tiempo (2 h), composición de sales fundentes (definida en el punto 2.3.1) y la cantidad de carga fundente (definida en el punto 2.3.2).

Se analizaron ensayos de fusión dentro de un rango de temperatura de 650 °C a 850 °C, en intervalos de 50 °C cada uno. El valor de temperatura que reportó el valor más alto de recuperación de aluminio fue utilizado en los ensayos posteriores.

2.3.4 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FUSIÓN

La determinación del tiempo de fusión se realizó manteniendo constantes los parámetros de composición de sales fundentes (definida en el punto 2.3.1) y la cantidad de carga fundente (definida en el punto 2.3.2) y temperatura (definida en el punto 2.3.3). Se realizaron un total de 10 ensayos de fundición durante 2,50 h en intervalos de 0,25 h cada uno, como se muestra detallado en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Variación del tiempo de fusión de las láminas de aluminio en los ensayos de fusión

Ensayo de Fusión	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tiempo (h)	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.0	2,25	2,50

El tiempo de fusión que reportó el valor más alto de recuperación de aluminio fue utilizado en los ensayos posteriores.

2.3.5 INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE FLOURURO DE POTASIO (KF)

Para la determinación de la influencia de la adición de fluoruro de potasio (KF) a la carga fundente se realizaron dos ensayos. Se mantuvo constantes los parámetros que reporten mayor recuperación de aluminio de los ensayos anteriores: la composición de la carga fundente (definida en el punto 2.3.1), porcentaje de carga (definida en el punto 2.3.2), temperatura (definida en el punto 2.3.3) y tiempo (definida en el punto 2.3.4).

La adición de KF se realizará en porcentajes de 5 % y 10 % con respecto a la carga fundente inicial. Se analizó la influencia de la adición de este reactivo en la recuperación de aluminio metálico.

2.3.6 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DEL ALUMINIO OBTENIDO

Con el fin de determinar las propiedades del aluminio metálico obtenido, Los productos de fusión fueron sometidos a análisis químico y mineralógico.

2.3.6.1 Caracterización química del aluminio obtenido

La caracterización química del producto obtenido por fundición, se realizó mediante espectrofotometría de chispa en el equipo Bruker Q4 TASMAN en el laboratorio del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional.

Se preparó la muestra con la finalidad de obtener una superficie lisa de al menos 2 cm mediante pulido con lija. La muestra obtenida fue analizada en un microscopio electrónico de barrido (MEB), de marca Tescan Vega, con el cual se obtuvo una imagen del producto y se realizó una cuantificación semicuantitativa de la superficie.

2.3.6.2 Caracterización mineralógica del aluminio obtenido

La caracterización mineralógica del producto obtenido por fundición, se realizó por difracción de rayos X (DRX) en el equipo D8 Advance Bruker de la Escuela Politécnica Nacional.

La cualificación y cuantificación de cada uno de los compuestos presentes en la muestra se determinó mediante el uso de los softwares EVA y TOPAS, respectivamente. La preparación de la muestra consistió en obtener limallas de aluminio metálico para su posterior análisis.

2.4 DEFINICIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS NECESARIOS PARA EL PROCESAMIENTO DE 5 T DE EMPAQUES FARMACÉUTICOS AL MES

La definición del diagrama de flujo de una planta de procesamiento de 5 t/mes de empaques *blister*, se realizó con base en los resultados experimentales que permitieron obtener las mayores recuperaciones de aluminio en las operaciones de lixiviación y fusión detallados en la sección 2.2 y 2.3. Se realizó los balances de masa y energía correspondientes para la determinación de los diagramas BFD y PFD.

Posteriormente, se realizó el dimensionamiento de los equipos necesarios para el funcionamiento de la planta de recuperación de aluminio. Dicho dimensionamiento se realiza tomando en cuenta la capacidad de procesamiento de la planta, las características de la materia prima definidas bajo los procedimientos de la sección 2.1 y las características de los productos definidos en la sección 2.1.6.

2.5 ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA CON CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE 5 T DE EMPAQUES FARMACÉUTICOS AL MES

Se realizó un estudio de prefactibilidad técnico-económica para las instalaciones planteadas en la sección 2.4. Dicho análisis se realizó para una capacidad de procesamiento de 5 t/mes de empaques farmacéuticos tipo *blister*.

El análisis requirió evaluar varios parámetros como el requerimiento de equipos, requerimiento de insumos, costo de equipos, costos de operación y costos de producto. La determinación de la factibilidad económica se realizó mediante el cálculo y análisis de tres indicadores. En primer lugar se calculó el valor actual neto mediante la ecuación 2.2.

$$VAN = -A + \sum_{t=1}^n Ft \times (1 + i)^{-t} \quad [2.2]$$

Donde:

Ft = valor neto de flujo de caja

i= tasa de retorno del período

t= períodos de tiempo analizados

Finalmente, se analizó la relación beneficio costo para determinar la factibilidad económica del proyecto planteado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos al realizar la metodología planteada en la sección 2. Los valores correspondientes a la caracterización física, química y mineralógica de los empaques tipo *blister*, la definición de las mejores condiciones de lixiviación y fusión para la obtención de aluminio metálico y el diseño de la planta para el tratamiento de 5 t/mes de material. Finalmente, se realizó un análisis de prefactibilidad económica del proyecto.

3.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LOS EMPAQUES UTILIZADOS POR LA INDUSTRIA FARMACÉUTICA

3.1.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS EMPAQUES FARMACÉUTICOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la metodología planteada en la sección 2.1, correspondiente a la caracterización física de los empaques farmacéuticos tipo *blister*.

3.1.1.1 Resultados de humedad

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos en la determinación de la humedad de los empaques farmacéuticos. Se realizó el ensayo por tres ocasiones y se obtuvo un promedio de estos valores. El ejemplo de cálculo realizado se especifica en el Anexo III.

La humedad promedio de las muestras analizadas presenta un valor del 5,13 %. La desviación estándar de los datos es del 11,98 %, por lo cual se puede inferir que

toda la materia prima presenta dicho valor de humedad. Además la diferencia entre el valor mayor y el menor no supera el 1 %.

Tabla 3.1. Porcentaje de humedad de empaques tipo *blister*

	Porcentaje de Humedad (%)
Muestra 1	5,18
Muestra 2	4,99
Muestra 3	5,21
Promedio	5,13

3.1.1.2 Resultados del contenido de material volátil

En la Tabla 3.2, se muestran los resultados obtenidos en la determinación del porcentaje de volátiles de los empaques farmacéuticos. Se realizó el ensayo por tres ocasiones y se obtuvo un promedio de estos valores. El ejemplo de cálculo realizado se especifica en el Anexo III.

Tabla 3.2. Porcentaje de volátiles de empaques tipo *blister*

	Porcentaje volátiles (%)
Muestra 1	76,45
Muestra 2	75,62
Muestra 3	75,60
Promedio	75,89

Las muestras de empaques empaques tipo *blister* analizados presentan un valor promedio de material volátil del 75,89 %. La temperatura de trabajo para el respectivo análisis fue de 750 °C con lo que se garantiza que durante los 7 min el material volátil es removido del crisol, es decir representa la cantidad de material polimérico contenido en el empaque incluyendo los plásticos correspondientes.

De acuerdo a datos bibliográficos, se especifica que el 80-85 % del *blister* corresponde al film formado es decir al material plástico y sus aditivos. (Pilchik, 2000, p.72).

Además, Endara (2004) determina de forma experimental que la cantidad de material volátil del material *blister* analizado es del 77,67 %, en comparación con el valor obtenido también de forma experimental en este proyecto, la diferencia es menor al 2 %.

Finalmente, la desviación estándar de los datos es del 48,51 % y la diferencia entre el valor máximo y valor mínimo es de apenas 1 %, por lo cual se puede inferir que toda la materia prima cumple con dicho valor de material volátil.

3.1.1.3 Resultados del contenido de carbón fijo y cenizas

En la Tabla 3.3, se muestran los resultados obtenidos en la determinación del porcentaje de cenizas y carbón fijo de los empaques farmacéuticos. Se realizó el ensayo por tres ocasiones y se obtuvo un promedio de estos valores. El ejemplo de cálculo realizado se especifica en el Anexo III.

Tabla 3.3. Porcentaje de carbón fijo y cenizas de empaques tipo *blister*

	Porcentaje de cenizas (%)	Porcentaje de carbón fijo (%)
Muestra 1	17,42	6,13
Muestra 2	18,24	6,14
Muestra 3	18,19	6,21
Promedio	17,95	6,16

Los empaques tipo *blister* presentan un valor promedio del 17,95 % de cenizas y 6,21 % de carbón fijo. El primer valor representa el aluminio metálico en adición a las tintas impregnadas sobre él.

Según datos bibliográficos, dentro del rango de 15-20 % corresponde al material de cubierta, es decir la lámina de aluminio y las tintas, la información experimental que se obtuvo coincide con el rango de valores especificados (Pilchik, 2000, p. 72).

Además, los valores experimentales reportados por Endara de cenizas y carbón fijo fueron de 16,89 % y 5,44 %, respectivamente. Lo cual presenta una tendencia similar a lo obtenido dentro de este proyecto (2004).

Finalmente, de acuerdo al análisis estadístico la desviación estándar de los datos es de 45,97 % y 4,35 % para material volátil y carbón fijo, respectivamente. Lo cual representa que los datos obtenidos no tienen mayor variación respecto a su promedio. Por tanto, se puede derivar que toda la materia prima cumple con el rango de valores establecidos.

3.1.1.4 Resultados de la densidad real y aparente

Para la determinación de la densidad aparente y real de los empaques farmacéuticos tipo *blister* se siguieron los procedimientos que se describen en la sección 2.1.1.5. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados de densidad aparente y densidad real de los empaque tipo *blister*

Parámetro	Valor (g/cm ³)
Densidad Real	1,42
Densidad aparente	0,07

La densidad aparente de los empaques tipo *blister* (sin comprimir) tienen un valor de 0,07 g/cm³, lo cual refleja que ocupan una gran cantidad de volumen. Por su parte, la densidad real reportó un valor de 1,42 g/cm³, es decir es más denso que el agua lo cual fue evidenciado en la prueba realizada.

3.1.2 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS EMPAQUES FARMACÉUTICOS

3.1.2.1 Resultados de la caracterización química de la lámina metálica de los empaques farmacéuticos tipo *blister*

El material metálico de los empaques farmacéuticos tipo *blister*, fue analizados químicamente para evaluar su composición. La metodología seguida se detalla en la sección 2.1.2. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Análisis químico del material metálico de los empaques tipo *blister*

Elemento	Porcentaje (%)
Aluminio (Al)	98,65
Hierro (Fe)	1,15
Silicio (Si)	0,06
Cobre (Cu)	<0,01
Manganeso (Mn)	0,01
Magnesio (Mg)	<0,01
Zinc (Zn)	0,01
Titanio (Ti)	0,03
Galio (Ga)	0,02
Fósforo (P)	<0,01
Vanadio (V)	<0,01
Boro (B)	<0,01

El análisis químico muestra que la lámina metálica del empaque tipo *blister* posee 98,65 % de aluminio (Al) y 1,15 % de hierro (Fe) como elementos principales. Esto demuestra un alto contenido del metal que se podría recuperar.

3.1.2.2 Resultados de la caracterización química del material polimérico de los empaques farmacéuticos tipo *blister*

La caracterización del material polimérico fue realizado con el objetivo de determinar su naturaleza para los ensayos posteriores.

Mediante los espectros obtenidos por infrarrojo de las dos muestras sometidas a análisis fue posible determinar el tipo de material polimérico del empaque. La primera corresponde a la lámina de polímero transparente, mientras que la segunda muestra corresponde a una lámina de polímero con coloración naranja. En la Figura 3.1, se muestra los dos films utilizados.

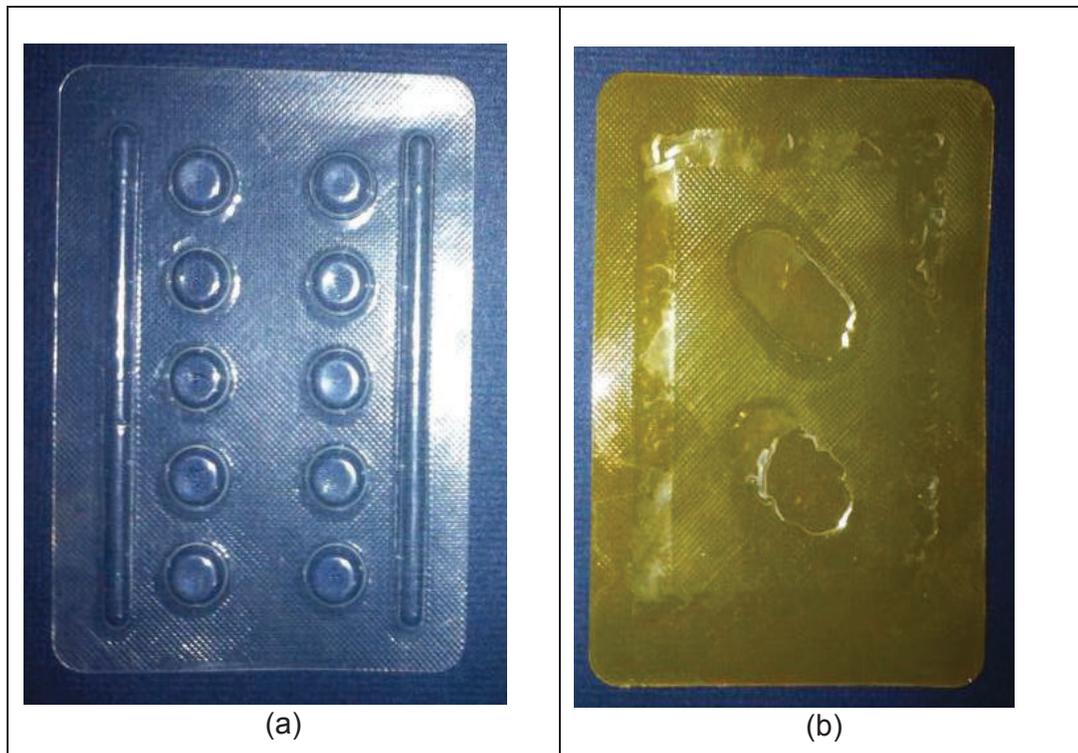


Figura 3.1. a) Lámina de material polimérico transparente, b) Lámina de material polimérico con coloración naranja

Los espectros infrarrojos obtenidos fueron superpuestos sobre un espectro estándar de policloruro de vinilo (PVC).

En la Figura 3.2, se observa el espectro de la muestra de polímero transparente. En la Figura 3.3, se observa la superposición del espectro de la muestra y el estándar.

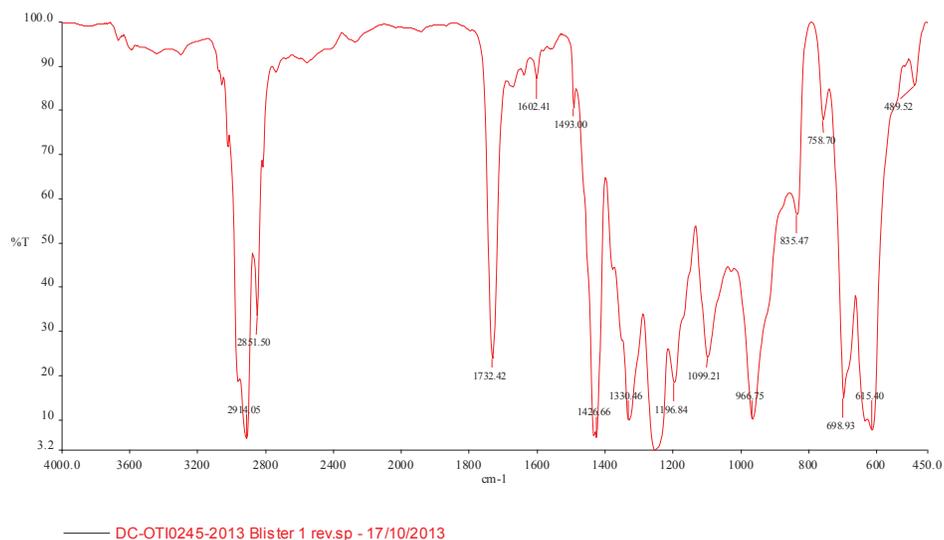


Figura 3.2. Espectro infrarrojo de la lámina de polímero transparente del material tipo *blister*

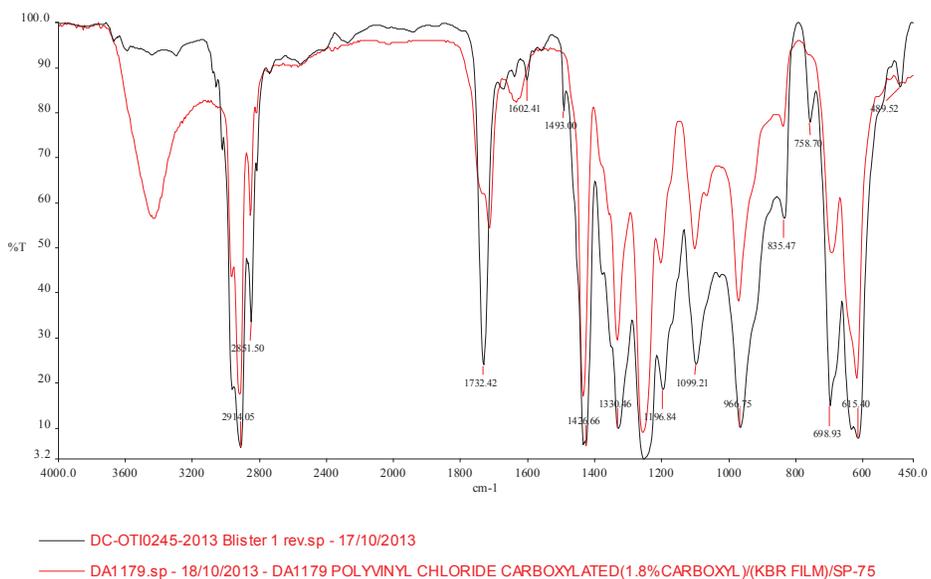


Figura 3.3. Espectro infrarrojo de la lámina de polímero transparente del material tipo *blister* superpuesto a un estándar de PVC.

Se puede observar que, para el caso de la lámina de material polimérico transparente, los picos coinciden en los valores más importantes, por lo cual es posible concluir que el material analizado es PVC.

Por su parte, en la Figura 3.4, se observa el espectro de la muestra de polímero con coloración naranja. En la Figura 3.5, se observa la superposición del espectro de la muestra y el estándar.

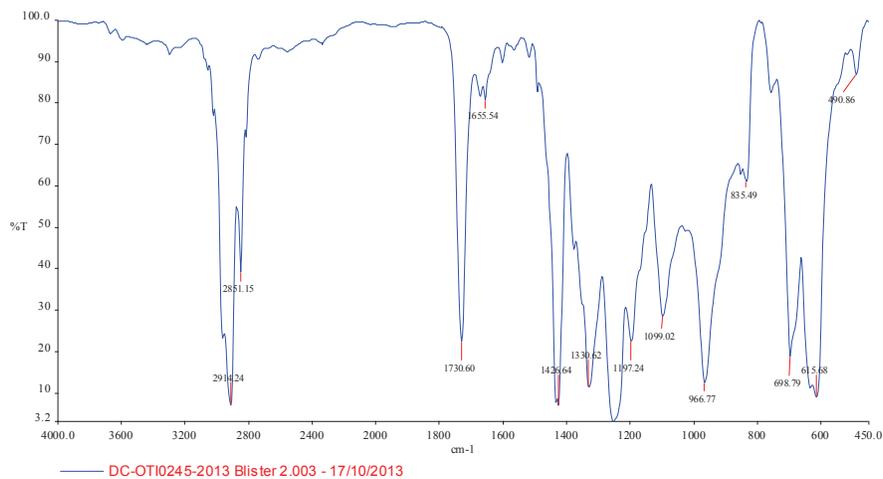


Figura 3.4. Espectro infrarrojo de la lámina de polímero color naranja del material tipo *blister*

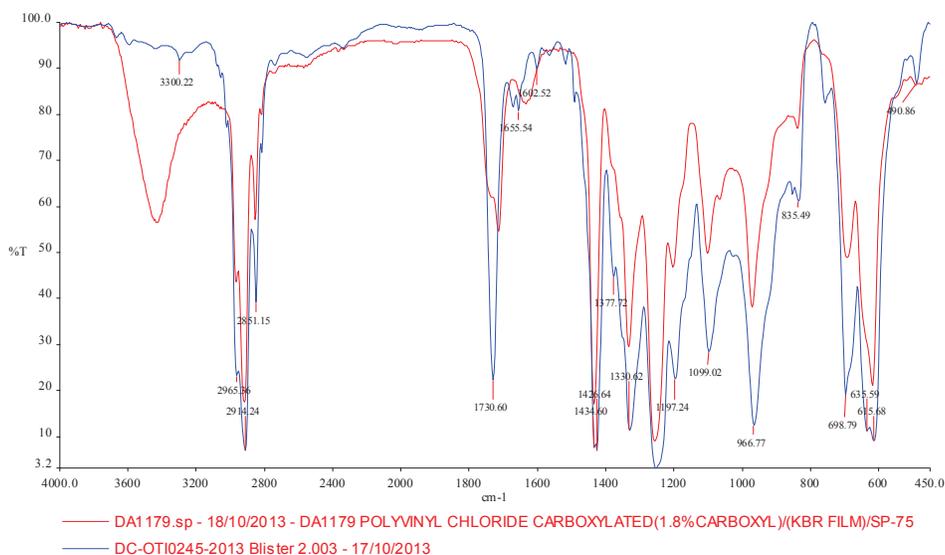


Figura 3.5. Espectro infrarrojo de la lámina de polímero de coloración naranja del material tipo *blister* superpuesto a un estándar de PVC

Se puede observar que, para el caso de la lámina de material polimérico de coloración naranja, los picos coinciden en los valores más importantes, por lo cual es posible concluir que el material polimérico también se trata de PVC.

3.1.3 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LOS EMPAQUES FARMACÉUTICOS

La caracterización mineralógica de las láminas de aluminio que componen los empaques tipo *blister* fue realizada siguiendo la metodología planteada en la sección 2.1.3.

En la Figura 3.6, se muestra el difractograma obtenido por en el equipo D8 Advance Bruker. La cualificación y cuantificación de cada uno de los compuestos presentes en la muestra se determinó mediante el uso de los softwares EVA y TOPAS.

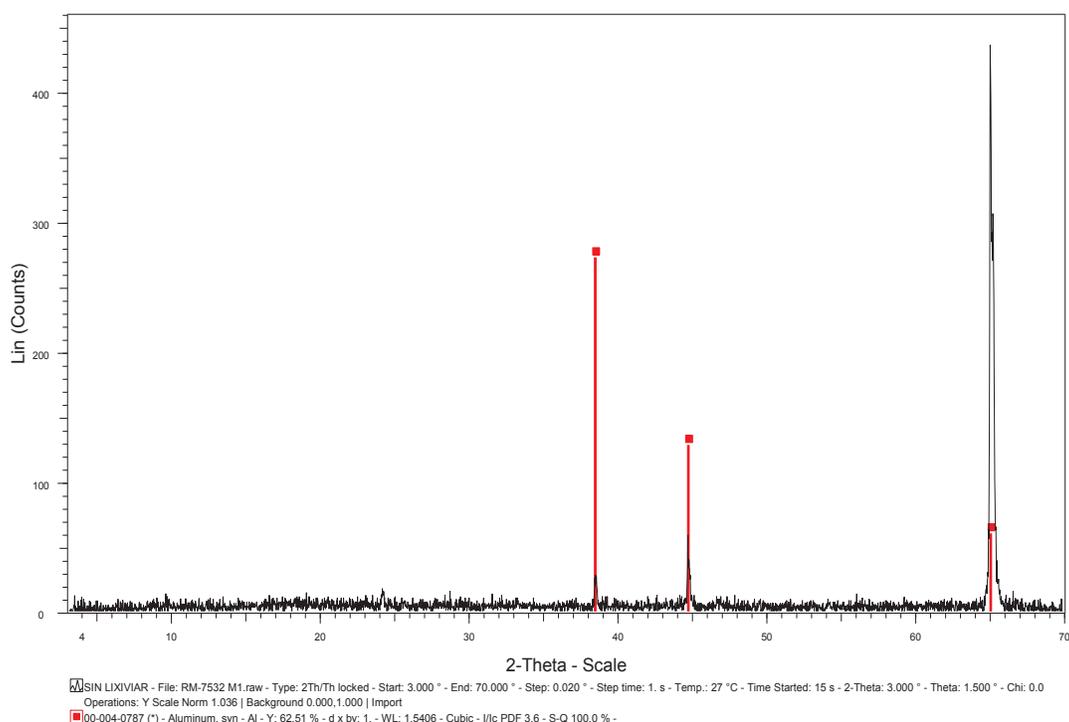


Figura 3.6. Difractograma de rayos X de la lámina metálica del empaque tipo *blister*

Como se puede observar, los picos del difractograma corresponden al patrón de aluminio metálico; por tanto, se puede concluir que ésta es la naturaleza del material que compone los empaques tipo *blister*. Además, de acuerdo al análisis cuantitativo se reporta un valor de 99 % de aluminio metálico; sin embargo, debido

a la precisión del equipo (1 % de detección) no se puede inferir sobre otros compuestos presentes en la muestra.

3.2 RESULTADOS DE LA DEFINICIÓN DE LAS MEJORES CONDICIONES DE LIXIVIACIÓN UTILIZANDO SOLVENTES ORGÁNICOS (ACETONA Y ACETATO DE N-BUTILO)

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos de lixiviación realizados a los empaques farmacéuticos tipo *blister*, de acuerdo a la metodología planteada en la sección 2.2. Los ensayos de lixiviación se realizaron con la finalidad de separar la capa metálica de la capa polimérica. De acuerdo a los resultados de la sección 3.1, los empaques farmacéuticos presentan un valor aproximado de 17,95 % de aluminio. Además, según datos bibliográficos el material de cubierta (lámina de aluminio) representa del 15 -20 % de la masa del empaque. Es decir, se requiere una disminución de peso de alrededor del 80 % para asegurar que el material metálico no posee residuos de PVC y pueda ser sometido a procesos de fundición.

Los ensayos de lixiviación fueron realizados con aproximadamente 4 g de empaques farmacéuticos, es decir se tiene 3,2 g de PVC y 0,8 g de aluminio. A continuación, se presentan los resultados obtenidos con respecto a la pérdida de masa del material procesado. Es decir, el proceso de lixiviación es de mayor eficiencia cuando el porcentaje de masa en el ensayo es mayor.

3.2.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LIXIVACION DE PVC CON ACETONA 98 %

El empaque farmacéutico tipo *blister*, conformado por PVC y aluminio fue sometido a ensayos de lixiviación con acetona al 98 %, para evaluar la eficiencia del proceso. En la Tabla 3.6, se muestran los resultados de lixiviación de PVC utilizando acetona

al 98 % como solvente. El ejemplo de cálculo se muestra en el Anexo IV. Como se puede observar, la pérdida de masa de la muestra tiene una tendencia creciente respecto al tiempo que se somete a lixiviación. Se alcanza un valor máximo de 80,41 % después de 180 min de operación. El porcentaje de pérdida de masa a los 150 min es de 79,14 %. Estos dos últimos valores aseguran que el material polimérico ha sido separado de la lámina metálica.

Tabla 3.6 Pérdida de masa de empaques tipo *blister* sometidos a proceso de lixiviación con acetona al 98 %

Tiempo de lixiviación (min)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Porcentaje de pérdida de masa (%)
30	4,00	3,12	21,98
60	4,03	3,41	40,24
90	4,01	1,69	57,80
120	4,01	1,31	67,29
150	4,00	0,84	79,14
180	4,00	0,78	80,41

En la Figura 3.7, se muestra la tendencia de pérdida de masa respecto al tiempo al que se sometió la muestra a lixiviación, al utilizar acetona al 98 % como solvente.

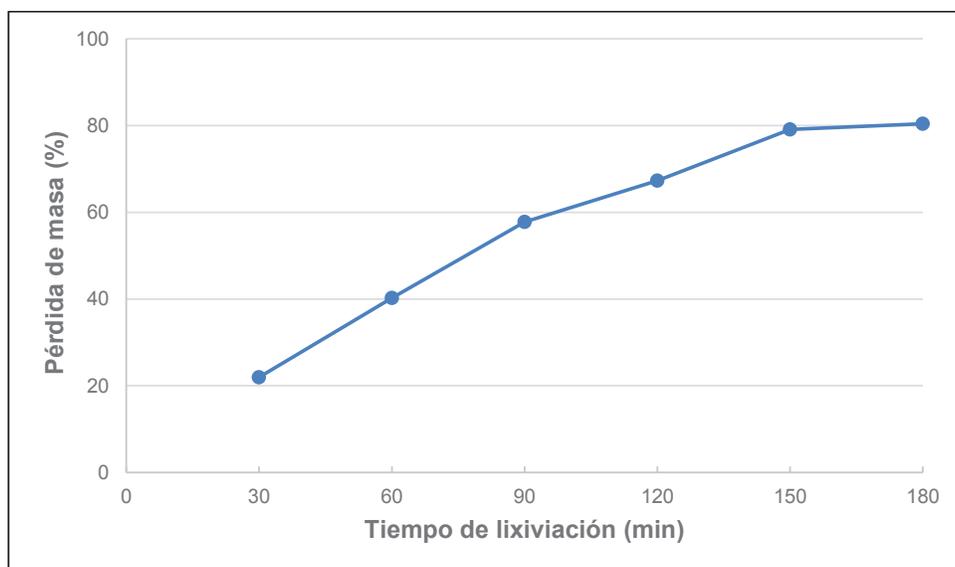


Figura 3.7. Porcentaje de pérdida de masa de PVC de empaques farmacéuticos tipo *blister* respecto al tiempo de lixiviación usando como solvente acetona al 98 %

Por debajo de los 120 min de operación el porcentaje de pérdida de masa en el proceso de lixiviación no supera el 70 %, es decir el material polimérico y el material metálico no se separan en su totalidad.

De acuerdo al requerimiento de que el producto de lixiviación contenga únicamente material metálico para ser sometido a procesos de fundición, se concluye que el material tipo *blister* al usar acetona al 98 % como solvente debe ser sometido a procesos de lixiviación de al menos 150 min.

En la Figura 3.8, se observa el producto de lixiviación bajo las condiciones mencionadas durante 150 min. Como se puede apreciar se logra una separación de la capa metálica de la polimérica además de la remoción de las tintas. El solvente actúa sobre el recubrimiento de sellado que se ubica entre las dos capas. El resultado es similar al obtenido por Endara (2004), al utilizar como solvente una solución de metil isobutil cetona durante 24 h. (p.87)



Figura 3.8. Fotografía de los productos obtenidos por lixiviación de empaques tipo *blister* usando como solvente acetona al 98 %

3.2.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN DE PVC CON ACETONA 50 %

En la Tabla 3.7, se muestran los resultados de lixiviación de PVC utilizando acetona al 50 % como solvente.

Tabla 3.7 Pérdida de masa de empaques tipo *blister* sometidos a proceso de lixiviación con acetona al 50 %

Tiempo de lixiviación (min)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Porcentaje de pérdida de masa (%)
30	4,17	3,45	17,18
60	3,97	3,22	18,94
90	4,04	2,98	26,14
120	4,08	2,68	34,17
150	4,10	2,54	37,93
180	3,99	2,42	39,34

En la Figura 3.9, se puede observar la tendencia de pérdida de masa respecto al tiempo que se sometió la muestra a lixiviación al utilizar acetona al 50 % como solvente.

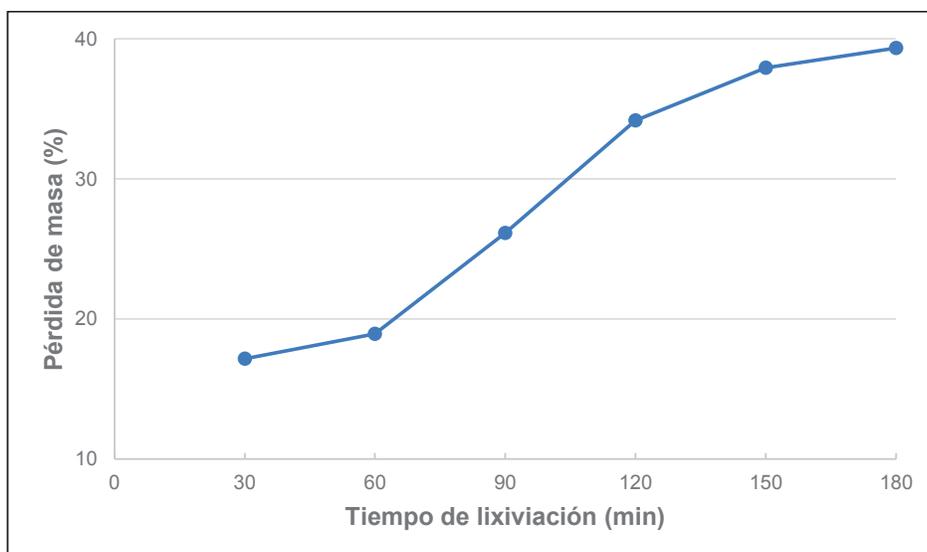


Figura 3.9. Porcentaje de pérdida de masa de PVC de empaques farmacéuticos tipo *blister* respecto al tiempo de lixiviación usando como solvente acetato de n-butilo al 50 %

La eficiencia de separación de los componentes del material tipo *blister* al usar acetona al 50 % disminuye de forma significativa, alcanzando un valor máximo de 39,34 % a los 180 min. Como se observa en la Figura 3.9, se mantiene una tendencia creciente respecto al tiempo. Sin embargo, no se logra tener resultados que permitan la separación de los componentes, por lo cual el producto de lixiviación bajo dichas condiciones no puede ser sometido a fundición.

En la Figura 3.10, se observa el producto de lixiviación bajo las condiciones mencionadas durante 180 min.



Figura 3.10. Fotografía de los productos obtenidos por lixiviación de empaques tipo *blister* usando como solvente acetona al 50 %

Como se puede apreciar no se logra una separación de la capa metálica de la polimérica, únicamente una deformación inicial del PVC. El solvente actúa sobre el recubrimiento de sellado sin embargo no se logra el objetivo de separación. El solvente al ser diluido en alcohol etílico pierde eficiencia dentro del proceso.

3.2.3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN DE PVC CON ACETONA 25 %

En la Tabla 3.8, se muestran los resultados de lixiviación de PVC utilizando acetona 25 % como solvente.

Tabla 3.8. Pérdida de masa de empaques tipo *blister* sometidos a proceso de lixiviación con acetona al 25 %

Tiempo de lixiviación (min)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Porcentaje de pérdida de masa (%)
30	4,08	3,87	5,02
60	4,12	3,71	9,74
90	3,97	3,40	14,45
120	3,98	3,33	16,18
150	4,00	3,30	17,42
180	3,04	3,37	16,72

En la Figura 3.11, se puede observar la tendencia de pérdida de masa respecto al tiempo que se sometió la muestra a lixiviación al utilizar acetona al 25 % como solvente.

Al realizar el proceso de lixiviación utilizando como solvente acetona 25 %, se logra un porcentaje de pérdida de masa máximo de 17,42 % correspondiente a 150 min de operación. Es decir, las condiciones de trabajo no permiten obtener un producto que pueda ser utilizado en operaciones posteriores de fundición.

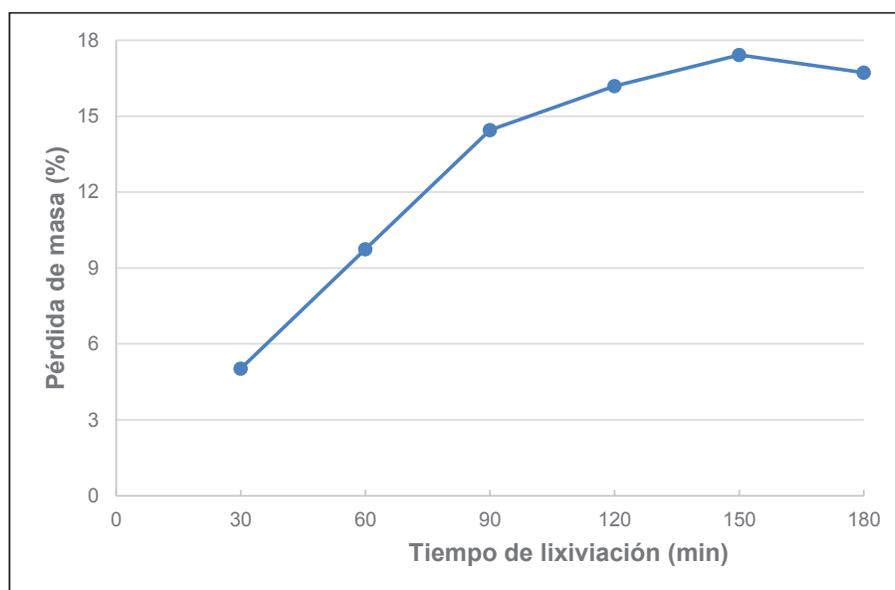


Figura 3.11. Porcentaje de pérdida de masa de PVC de empaques farmacéuticos tipo *blister* respecto al tiempo de lixiviación usando como solvente acetona al 25 %

En la Figura 3.12, se observa el producto de lixiviación bajo las condiciones mencionadas durante 180 min. Como se puede apreciar, no se logra la separación de las capas ni un efecto sobre las tintas en la capa metálica de los empaques.



Figura 3.12. Fotografía de los productos obtenidos por lixiviación de empaques tipo *blister* usando como solvente acetona al 25 %

3.2.4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LIXIVACIÓN DE PVC CON ACETATO DE N-BUTILO 98 %

El empaque farmacéutico tipo *blister*, conformado por PVC y aluminio fue sometido a ensayos de lixiviación con acetato de n-butilo al 98 %, para evaluar la eficiencia del proceso y la factibilidad de utilizar el producto de esta operación en procesos posteriores de fundición.

En la Tabla 3.9, se muestran los resultados de lixiviación de PVC utilizando acetato de n-butilo al 98 % como solvente.

Tabla 3.9. Pérdida de masa de empaques tipo *blister* sometidos a proceso de lixiviación con acetato de n-butilo al 98 %

Tiempo de lixiviación (min)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Porcentaje de pérdida de masa (%)
30	3,98	2,35	41,12
60	4,06	2,11	47,89
90	4,13	1,75	57,57
120	4,13	1,24	69,67
150	4,04	0,75	81,39
180	3,99	0,79	80,18

En la Figura 3.13, se puede observar la tendencia de pérdida de masa respecto al tiempo que se sometió la muestra a lixiviación. Se evidencia una tendencia creciente de pérdida de masa del empaque tipo *blister*, respecto al tiempo que se somete a lixiviación con acetato de n-butilo al 98 %. Se alcanza un valor máximo de 80,18 % a los 150 min a partir de este valor la tendencia es constante.

De acuerdo al requerimiento de la materia prima que se someterá a procesos de fusión, la lixiviación bajo estas condiciones es un proceso eficiente ya que logra eliminar en su totalidad el material polimérico del material metálico.

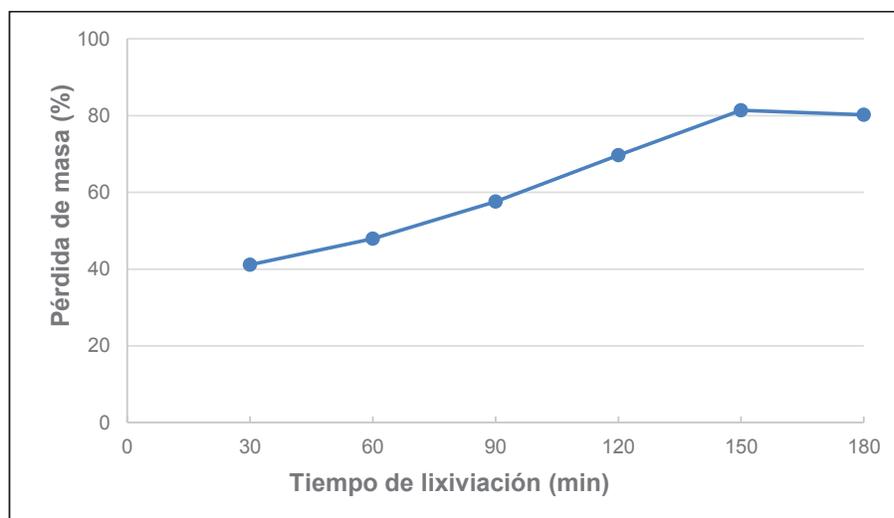


Figura 3.13. Porcentaje de pérdida de masa de PVC de empaques farmacéuticos tipo *blister* respecto al tiempo de lixiviación usando como solvente acetato de n-butilo al 98 %

En la Figura 3.14, se muestra el producto de lixiviación obtenido al trabajar con acetato de n-butilo al 98 % durante 150 min. Como se puede observar el producto está constituido únicamente por el material metálico, es decir se logra eliminar en su totalidad la parte polimérica del empaque tipo *blister*.



Figura 3.14. Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de lixiviación utilizando como solvente acetato de n-butilo al 98 % durante 150 min

3.2.5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN DE PVC CON ACETATO DE N-BUTILO 50 %

En la Tabla 3.10, se muestran los resultados de lixiviación de PVC utilizando acetato de n-butilo al 50 % como solvente.

Tabla 3.10. Pérdida de masa de empaques tipo *blister* sometidos a proceso de lixiviación con acetato de n-butilo al 50 %

Tiempo de lixiviación (min)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Porcentaje de pérdida de masa (%)
30	4,0567	3,7515	7,52
60	4,0132	3,4378	14,34
90	4,0328	3,0241	25,01
120	4,0796	2,9247	28,31
150	4,0513	2,7413	32,34
180	4,0042	2,6471	33,89

En la Figura 3.15, se puede observar la tendencia de pérdida de masa respecto al tiempo que se sometió la muestra a lixiviación al utilizar acetona al 50 % como solvente.

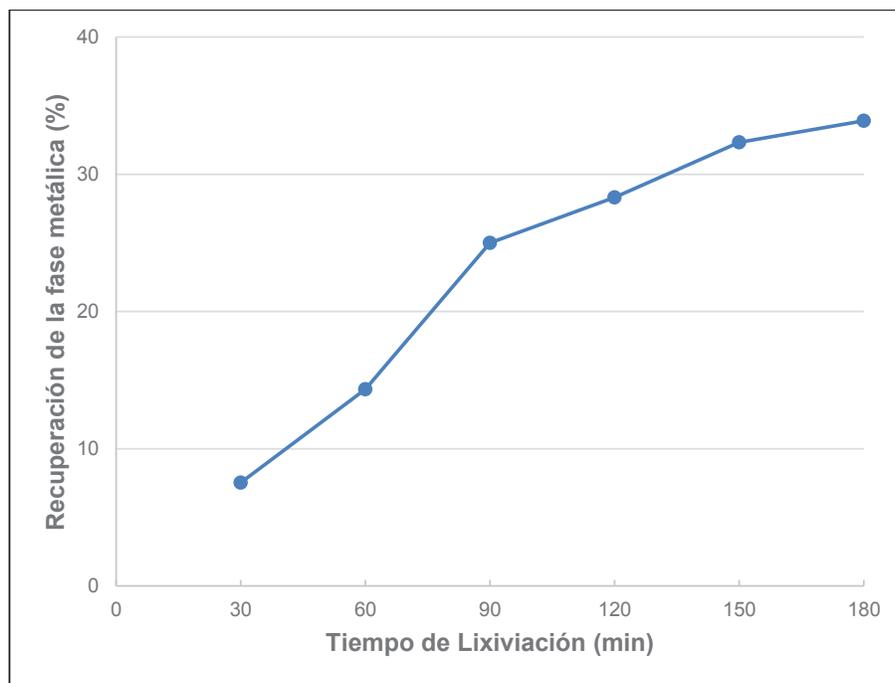


Figura 3.15. Porcentaje de pérdida de masa de PVC de empaques farmacéuticos tipo *blister* respecto al tiempo de lixiviación usando como solvente acetato de n-butilo al 50 %

En la Figura 3.15, se puede observar que la pérdida de masa en los ensayos de lixiviación utilizando como solvente acetato de n-butilo al 50 % muestra una tendencia creciente y alcanza un valor máximo 33,89 % a los 180 min de operación.

La pérdida de masa que se requiere para que las láminas de aluminio puedan ser utilizadas en procesos posteriores está en el rango del 80 %. Por lo tanto se considera que el proceso de lixiviación bajo estas condiciones es ineficiente.

En la Figura 3.16, se muestra el producto de lixiviación obtenido al trabajar con acetato de n-butilo al 50 % durante 180 min. Como se puede observar el producto contiene tanto material polimérico como material metálico, es decir no se ha logrado una separación de las partes constituyentes.



Figura 3.16. Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de lixiviación utilizando como solvente acetato de n-butilo al 50 % durante 180 min

3.2.6 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN DE PVC CON ACETATO DE N-BUTILO 25 %

En la Tabla 3.11, se muestran los resultados de lixiviación de PVC utilizando acetato de n-butilo al 25 % como solvente.

Tabla 3.11. Pérdida de masa de empaques tipo *blister* sometidos a proceso de lixiviación con acetona al 25 %

Tiempo de lixiviación (min)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Porcentaje de pérdida de masa (%)
30	4,07	3,97	2,44
60	4,02	3,84	4,37
90	4,02	3,54	11,94
120	4,09	3,51	14,20
150	4,06	3,49	14,22
180	4,01	3,42	14,74

En la Figura 3.17, se puede observar la tendencia de pérdida de masa respecto al tiempo de la muestra a lixiviada con acetato de n-butilo al 25 % como solvente.

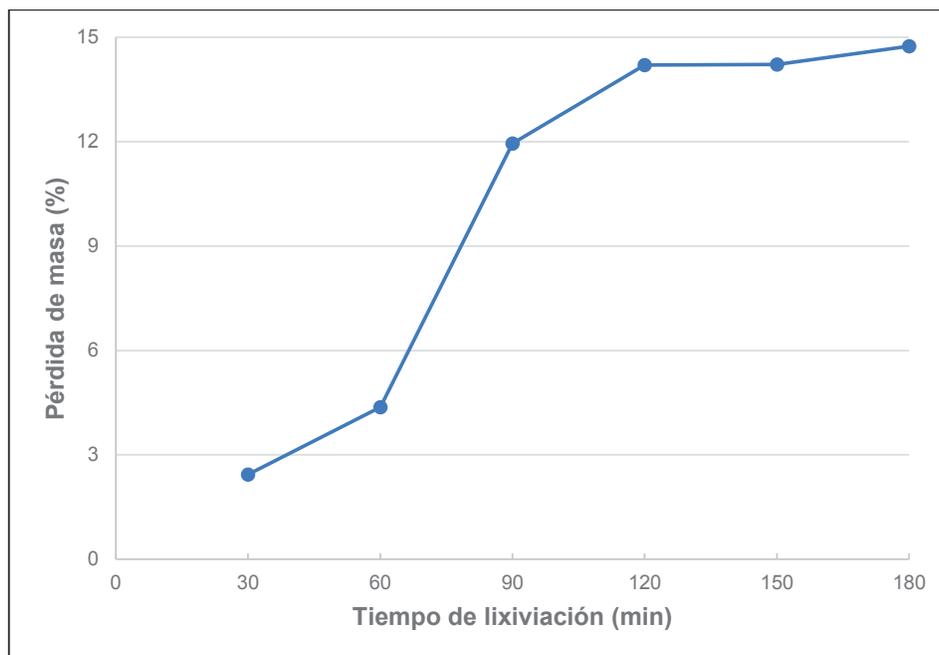


Figura 3.17. Porcentaje de pérdida de masa de PVC de empaques farmacéuticos tipo *blister* respecto al tiempo de lixiviación usando como solvente acetato de n-butilo al 25 %

En la Figura 3.17, se puede observar que el proceso de lixiviación utilizando acetato de n-butilo al 25 % logra a penas una disminución de masa del 14,74 % en el mejor de los casos. Es decir, el producto que se obtiene de este proceso no puede ser sometido a fundición ya que no se ha logrado la separación de la capa polimérica de la metálica.

3.2.7 RESULTADOS DE LA DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE LIXIVIACIÓN

Al analizar los resultados presentados en la secciones 3.2.1 a la 3.2.6, se observa que únicamente al utilizar los solventes puros (98 %) se logra eliminar el material polimérico en su totalidad del empaque *blister*. En la Figura 3.18, se muestra el comportamiento de lixiviación de empaques tipo *blister*, al utilizar acetona y acetato de n-butilo como solventes a diferentes concentraciones.

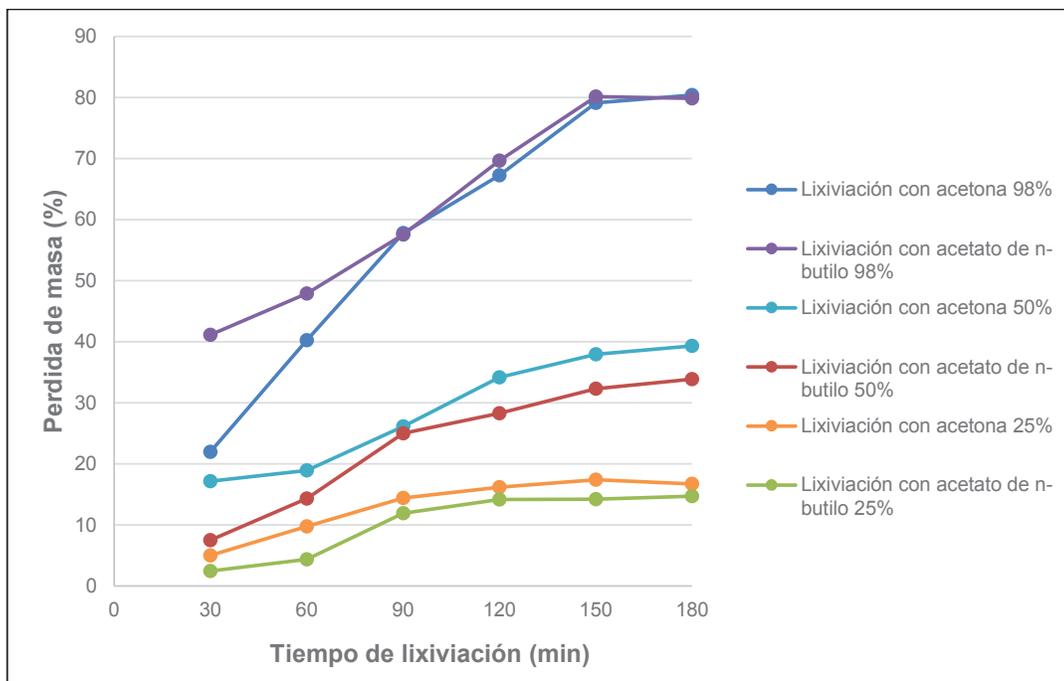


Figura 3.18. Porcentaje de pérdida de masa de empaques farmacéuticos tipo *blister* sometidos a procesos de lixiviación con acetona y acetato de n-butilo al 98 %, 50 % y 25 %

En la Figura 3.18, se puede observar que la lixiviación al utilizar solventes diluidos con alcohol etílico, disminuye el porcentaje de pérdida de masa; por lo cual, no se consideran condiciones favorables para la obtención de una materia prima compuesta únicamente por la lámina metálica.

Además, en el caso de solventes al 50 % y 25 % la pérdida de masa es mayor al utilizar acetona respecto a la que se obtiene al usar acetato de n-butilo. Esto puede explicarse debido a la diferencia de puntos de ebullición de los componentes de las mezclas. Para el caso de acetona y alcohol etílico, los puntos de ebullición son aproximadamente de 56 °C y 78 °C, respectivamente. La diferencia de puntos de ebullición es de alrededor de 20 °C. Por su parte, el acetato de n-butilo tiene un punto de ebullición de 126 °C, es decir la diferencia de puntos de ebullición de los componentes es de alrededor de 50 °C. Es decir, mientras mayor es esta diferencia en los puntos de ebullición de los componentes de la mezcla utilizada, el proceso de separación se hace menos eficiente debido a que uno de los componentes alcanza el estado de ebullición antes.

Es necesario tomar en cuenta que, de acuerdo a las regulaciones realizadas por el Consejo Nacional de Control de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas (CONSEP), la acetona corresponde al tipo de sustancias precursoras por lo cual esta sujeta a fiscalización dentro del país mientras que el acetato de n-butilo no presenta limitaciones de consumo.

Los ensayos realizados muestran que el mejor proceso de lixiviación de empaques tipo *blister*, es aquel que utiliza acetato de n-butilo al 98 % durante un tiempo de 150 min.

En la Figura 3.19, se muestra la tendencia de pérdida de masa respecto al tiempo, de una muestra sometida a lixiviación utilizando acetato de n-butilo al 98 % puro respecto a la obtenida al utilizar acetato de n-butilo recuperado de ensayos de lixiviación previos. Las curvas de pérdida de masa tienen la misma tendencia y se superponen entre sí. Esto quiere decir que, la eficiencia del proceso no disminuye al trabajar con solvente recuperado debido a que la destilación asegura la separación del material polimérico disuelto y el solvente.

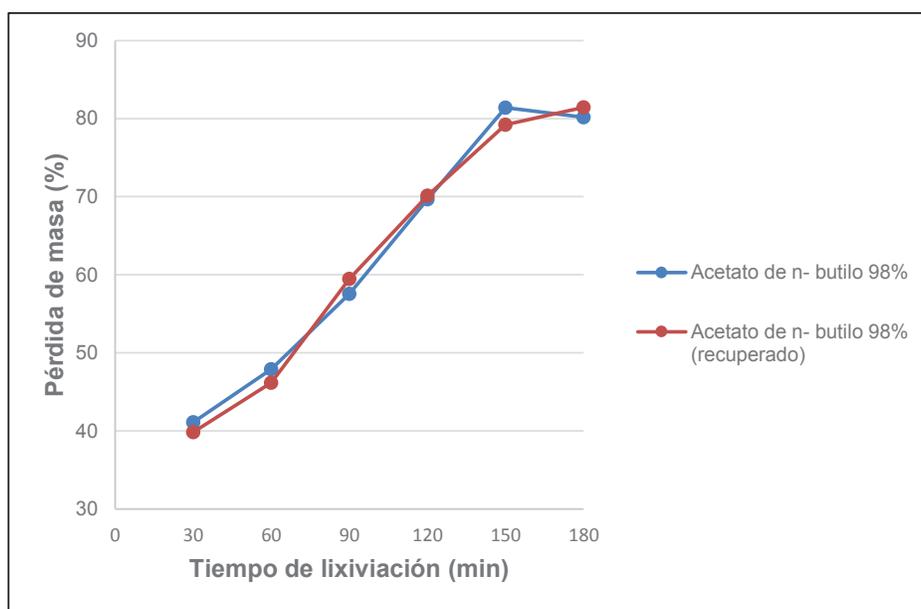


Figura 3.19. Porcentaje de pérdida de masa de empaques farmacéuticos tipo *blister* sometidos a procesos de lixiviación con acetato de n-butilo 98 % puro y recuperado

3.2.8 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DEL ALUMINIO OBTENIDO POR LIXIVIACIÓN

El material metálico producto de la lixiviación fue analizado químicamente para evaluar su composición y los cambios que pudo haber ocasionado el proceso.

La preparación de la muestra consistió en recolectar pedazos de aluminio sometido a lixiviación de aproximadamente 2 cm. El análisis se realizó mediante espectrofotometría de chispa en el equipo Bruker Q4 TASMAN en el laboratorio del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional.

En la Tabla 3.12 se muestran los resultados reportados por espectrofotometría de chispa.

Tabla 3.12. Análisis químico del material metálico producto de la lixiviación

Elemento	Porcentaje
Aluminio (Al)	98,57
Hierro (Fe)	0,73
Silicio (Si)	0,55
Cobre (Cu)	0,03
Manganeso (Mn)	<0,01
Magnesio (Mg)	<0,01
Zinc (Zn)	0,01
Titanio (Ti)	0,02
Galio (Ga)	0,02
Fósforo (P)	<0,01
Vanadio (V)	<0,01
Boro (B)	<0,01

El análisis químico muestra que el producto de la lixiviación posee 98,57 % de Al y 0,73 % de Fe como elementos principales.

Si comparamos la composición química de las láminas de aluminio antes del proceso de lixiviación respecto a las que después de dicho proceso, se observa que se logra tener una disminución del 1,15 % al 0,73 % de Fe.

La caracterización mineralógica del producto fundido fue realizada para determinar la naturaleza de los componentes. En la Figura 3.20, se muestra el difractograma obtenido por en el equipo D8 Advance Bruker. La cualificación y cuantificación de cada uno de los compuestos presentes en la muestra se determinó mediante el uso de los softwares EVA y TOPAS, respectivamente.

De acuerdo al difractograma obtenido en la Figura 3.20, la ubicación de los picos corresponden al aluminio metálico. Además, el análisis cuantitativo reporta un valor del 99 % de aluminio metálico. Por tanto, se puede asegurar que el aluminio conserva su naturaleza metálica después de ser sometido al proceso de lixiviación.

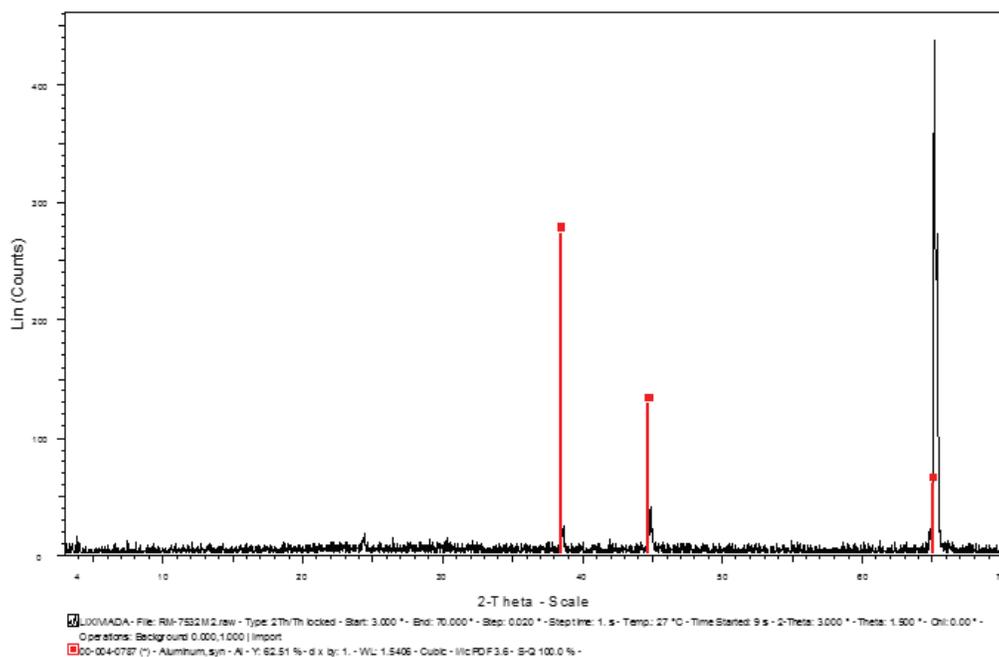


Figura 3.20. Difractograma de rayos X del producto obtenido después del proceso de lixiviación

En la Figura 3.21, se puede observar la comparación de una muestra de láminas metálicas antes de lixiviar y una después del proceso de lixiviación, líneas color negro y azul, respectivamente.

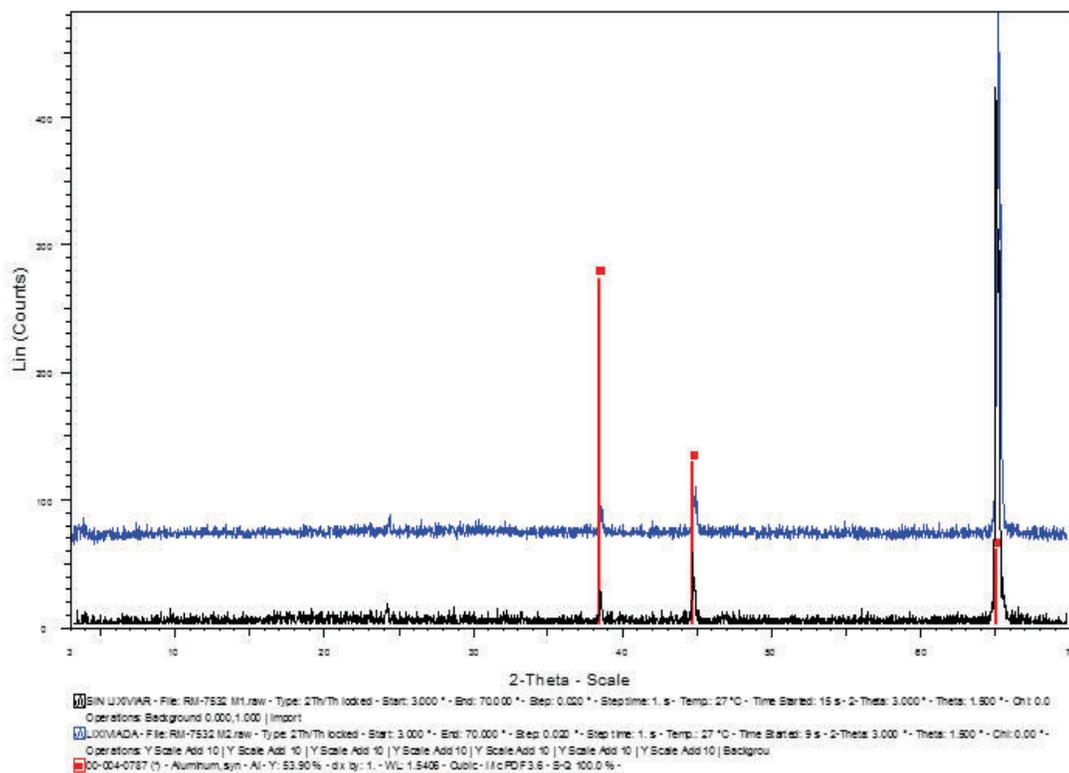


Figura 3.21. Difractograma de rayos X de una muestra de láminas de aluminio sin someterse a lixiviación superpuesta a una muestra sometida a lixiviación

Como se puede observar los picos no han cambiado de lugar para las dos muestras, es decir, el aluminio no presenta variaciones respecto a la naturaleza en la que se presenta antes y después de los procesos de lixiviación.

3.3 RESULTADOS DE LA DEFINICIÓN DE LAS MEJORES CONDICIONES DEL PROCESO DE FUSIÓN UTILIZANDO SALES DE CLORO Y FLÚOR

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para los procesos de fusión de acuerdo a la metodología planteada en la sección 2.3. Después de cada ensayo de fusión se obtiene como producto dos fases, una metálica y una de escoria. El porcentaje de recuperación se calcula con base en el peso de la fase metálica obtenida.

3.3.1 RESULTADOS DE LA CONCENTRACIÓN DE LAS SALES DENTRO DE LA CARGA FUNDENTE

Los ensayos de fusión para la determinación de la concentración de cada sal dentro de la carga fundente, se realizaron siguiendo la metodología planteada en la sección 2.3.1. Los parámetros que se mantuvieron constantes fueron la temperatura (750 °C), el tiempo de fusión (2 h) y el porcentaje de carga fundente (200 %). En la Tabla 3.13, se indica el porcentaje de recuperación obtenido para cada ensayo respecto al peso inicial de muestra sometida a fusión.

Tabla 3.13. Porcentaje de recuperación de Al metálico obtenido en la fusión de láminas para la determinación de la composición de carga fundente

Ensayo	Composición molar de sales		Masa Inicial (g)	Masa Recuperada (g)	Recuperación (%)
	% NaCl	% KCl			
1	100	0	2,02	0	0,00
2	90	10	2,02	0,52	25,71
3	80	20	2,03	0,71	35,04
4	70	30	2,01	0,81	40,28
5	60	40	2,06	1,34	64,94
6	50	50	2,02	1,27	62,69
7	40	60	2,01	1,08	54,01
8	30	70	2,01	0,81	40,19
9	20	80	2,02	0,63	30,85
10	10	90	2,00	0,11	5,38
11	0	100	2,01	0	0,00

En la Figura 3.22, se muestra el porcentaje de recuperación de la fase metálica respecto a la composición molar de NaCl en el proceso de fundición.

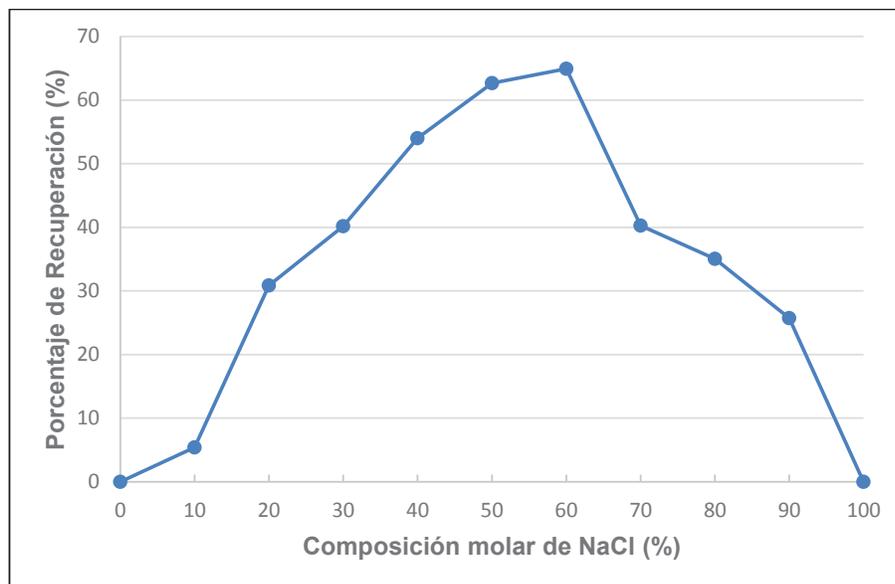


Figura 3.22. Porcentaje de recuperación de la fase metálica respecto a la composición molar de NaCl al realizar procesos de fundición de láminas de aluminio

Como se puede observar en la Figura 3.22, los porcentajes de mayor recuperación se sitúan en la parte media de la gráfica, lo cual tiene dependencia directa al comportamiento de las sales y la variación del punto de fusión al ser combinadas en diferentes proporciones (punto eutéctico).

Al trabajar únicamente con NaCl no se logra recuperar ninguna cantidad de aluminio; sucede de igual forma, al utilizar únicamente KCl como carga fundente. Esto ocurre debido a que no se logra formar la capa protectora que evita la formación de óxido de aluminio. Además, los ensayos de fundición se realizaron a 750°C y la temperatura de fusión del NaCl es 802 °C y de KCl es 775 °C, es decir las sales no llegan al punto de fusión (Totten y Mackenzie, 2003, p.129).

Las sales no han sufrido ningún cambio, mantienen el color y textura que tenían antes de ser sometidas a proceso de fundición. Además, las láminas de aluminio no sufren cambios significativos. Al utilizar una carga fundente compuesta por NaCl y KCl en proporciones molares de 90 % y 10 %, respectivamente, se logra una recuperación de aluminio de 25,71 %. Las sales fundentes en su mayoría no han sufrido mayor cambio; sin embargo, ya se observa el apareamiento de una fase metálica.

Al realizar el proceso de fundición con una carga fundente compuesta por 80 % NaCl y 20 % KCl, se logra una recuperación de la fase metálica de 35,04 %. Por su parte, al modificar la composición a 70 % NaCl y 30 % KCl, la recuperación lograda es de 40,28 %. Las sales ya experimentan fenómenos de fusión por lo cual muestran un cambio de coloración; sin embargo, la formación de una fase metálica no se evidencia de forma exitosa. Esto puede ser explicado con base en las propiedades del aluminio, éste posee propiedades de alta reactividad con el oxígeno por lo cual para estos ensayos la mayor parte de aluminio pasa a formar óxidos (Totten y Mackenzie, 2003, p.119).

La recuperación de la fase metálica al utilizar una composición molar de 60 % de NaCl y 40 % de KCl es de 64,94 %, al usar una composición equimolar de las sales la recuperación es de 62,69 % y al emplear una composición de 40 % de NaCl y 60 % de KCl la recuperación de la fase de interés es de 54,01 %. Éstos corresponden a valores de mayor recuperación en la determinación de la concentración de las sales dentro de la carga fundente. De acuerdo a datos bibliográficos, una composición equimolar de las sales predice una mayor recuperación de la fase metálica debido al punto eutéctico formado, hecho que se demuestra al realizar los ensayos de fundición. En la Figura 3.23, 3.24 y 3.25, se muestran los productos obtenidos tanto de la fase metálica como del producto de las sales fundentes. Como se puede observar se evidencia claramente la formación de una fase metálica con brillo característico correspondiente a aluminio.



Figura 3.23. Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de láminas de Al como indica el Ensayo No.5

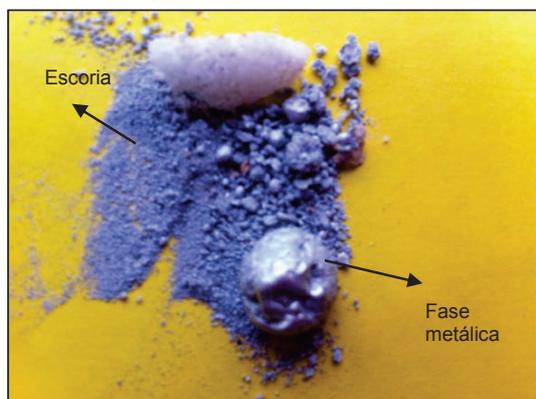


Figura 3.24. Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de láminas de Al como indica el Ensayo No.6



Figura 3.25. Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de láminas de Al como indica el Ensayo No.7

Para el caso de una composición molar de 30 % NaCl y 70 % KCl, la recuperación lograda es de 40,19 %. Por su parte, al utilizar la carga fundente compuesta por 20 % de NaCl y 80 % de KCl la recuperación de la fase metálica alcanzada es de 30,85 %. Es decir, el proceso de fundición disminuye la eficiencia respecto a las condiciones anteriores.

Finalmente, al utilizar una carga fundente constituida por 10 % de NaCl y 90 % de KCl, se logra una recuperación de la fase metálica de apenas del 5,38 %. Es decir, es un proceso de fundición ineficiente. Las sales no cambian de apariencia, por lo cual se incide que no se ha alcanzado su estado de fusión. Además, la fase metálica tiene aspecto de material oxidado por lo cual la recuperación es tan baja.

La carga fundente que reportó mayor recuperación de aluminio, correspondiente a una composición molar de 60 % de NaCl y 40 % KCl, fue utilizada para los ensayos posteriores.

3.3.2 RESULTADOS DE LA DEFINICIÓN DEL PORCENTAJE DE CARGA FUNDENTE

Los ensayos de fusión para la determinación del porcentaje de carga fundente, se realizaron siguiendo la metodología planteada en la sección 2.3.2.

Los parámetros que se mantuvieron constantes fueron la temperatura de 750 °C, el tiempo de fusión de 2 h y la composición de la carga fundente correspondiente al 60 % de NaCl y 40 % de KCL (obtenida de la sección 3.3.1).

En la Tabla 3.14, se indica el porcentaje de recuperación obtenido para cada ensayo respecto al peso inicial de muestra sometida a fusión.

Tabla 3.14. Porcentaje de recuperación de Al metálico obtenido en la fusión de láminas para la determinación de la composición de carga fundente

Ensayo No.	Porcentaje de carga fundente	Masa Inicial (g)	Masa Recuperada (g)	Porcentaje de recuperación
12	0	2,00	0	0
13	100	2,01	1,12	55,82
14	300	2,04	1,01	49,59
15	400	2,05	0,94	45,87

En la Figura 3.26, se muestra el porcentaje de recuperación de la fase metálica respecto al porcentaje de carga fundente utilizada.

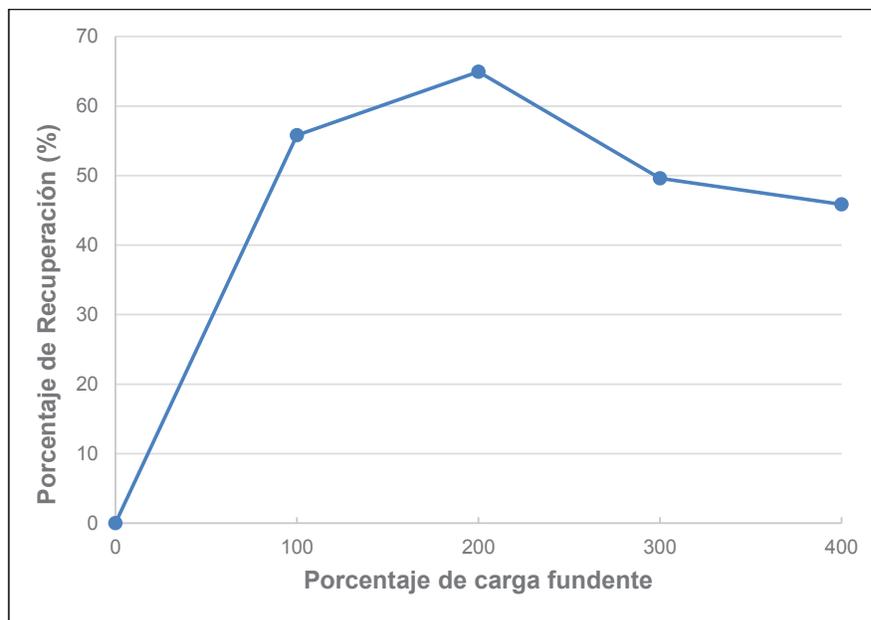


Figura 3.26. Porcentaje de recuperación de la fase metálica respecto al porcentaje de carga fundente al realizar procesos de fundición de láminas de aluminio

En la Figura 3.26, se puede observar que el porcentaje de recuperación de la fase metálica tiene un comportamiento creciente hasta llegar a un valor máximo, después de éste la tendencia se revierte y toma un sentido decreciente.

Al realizar el ensayo de fundición en ausencia de sales fundentes, no se logra tener recuperación de fase metálica. Esto sucede debido a la alta reactividad del aluminio con el oxígeno y la humedad del ambiente en el cual se realiza el proceso de fusión. Por lo cual, es necesario utilizar carga fundente en el proceso de fusión.

El porcentaje de recuperación de la fase metálica al trabajar con 100 % de porcentaje de carga fundente se eleva a 55,82 %. La disminución en el porcentaje de recuperación de la fase metálica usando 100 % de carga fundente, respecto a la obtenida al usar 200 % (64,94 % de recuperación), se debe a que bajo las primeras condiciones, dentro del crisol, no se logra cubrir el material metálico en su totalidad, lo cual favorece procesos de oxidación con el ambiente.

Al utilizar porcentajes de carga fundente de 300 % y 400 % el porcentaje de recuperación de la fase metálica decrece a 49,59 % y 45,87 %, respectivamente.

Dicho comportamiento se debe a que la carga fundente no alcanza el punto de fusión, por lo cual no logra formar la capa protectora que evita la formación de óxido.

El porcentaje de carga fundente que reportó mayor recuperación de aluminio corresponde a 200 % respecto a la carga sometida a fusión, este valor fue utilizado para los ensayos posteriores.

3.3.3 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA

Los ensayos para la determinación de la temperatura de fusión se realizaron siguiendo la metodología planteada en la sección 2.3.3.

Los parámetros que se mantuvieron constantes fueron la composición de la carga fundente correspondiente al 60 % de NaCl y 40 % de KCl (obtenida de la sección 3.3.1), el porcentaje de carga fundente del 200 % (obtenida de la sección 3.3.2) y el tiempo de fusión (2 h).

En la Tabla 3.15, se indica el porcentaje de recuperación de la fase metálica obtenido para cada ensayo respecto al peso inicial de muestra sometida a fusión.

Tabla 3.15. Porcentaje de recuperación de Al metálico obtenido en la fusión de láminas para la determinación de la temperatura de trabajo

Ensayo	Temperatura de fusión (°C)	Masa Inicial (g)	Masa Recuperada (g)	Porcentaje de recuperación
16	650	2,0179	0	0,00
17	700	2,0064	0,8412	41,93
18	800	1,9961	0,7916	39,66
19	850	2,0843	0,7431	35,65

En la Figura 3.27, se muestra el porcentaje de recuperación de la fase metálica respecto a la temperatura de fusión.

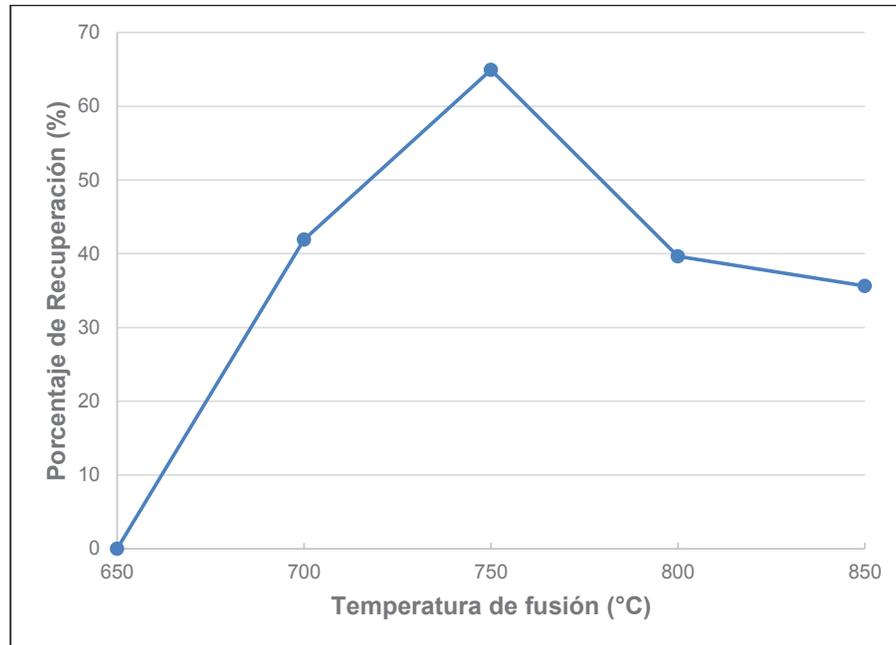


Figura 3.27. Porcentaje de recuperación de la fase metálica respecto al porcentaje de carga fundente al realizar procesos de fundición de láminas de aluminio

En la Figura 3.27, se puede observar que el porcentaje de recuperación de la fase metálica tiene un comportamiento creciente hasta llegar a un valor máximo, correspondiente a 750 °C; después de éste, la tendencia se vuelve decreciente.

Al realizar el ensayo de fundición a 650 °C, no se logra tener recuperación de fase metálica, debido a que las sales no alcanzan el punto de fusión. Es decir no se logra formar la capa protectora, esto a su vez provoca que el material se combine con el oxígeno del ambiente.

El material se oxida en su totalidad por lo cual no se evidencia fase metálica. El punto de fusión del aluminio es de 660 °C, por lo cual no se produce el cambio de fase a dicha temperatura.

Al trabajar a 700°C, se logra una recuperación de la fase metálica de 41,93 %. La recuperación aumenta con el incremento de la temperatura a 750 °C, alcanzando una recuperación del 64,94 %. Sin embargo, al trabajar a 800 °C y 850°C, los valores disminuyen a 39,66 % y 35,65 %, respectivamente.

Según Aspin (1995), al trabajar bajo temperaturas de fundición elevadas se perjudica la recuperación del aluminio. Esto sucede debido a que el aluminio fundido al permanecer a temperaturas elevadas empieza a generar mayores cantidades de óxidos. Por esta razón, las recuperaciones de menor valor se tienen al trabajar a temperaturas superiores a 800°C (p. 80).

3.3.4 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FUSIÓN

Los ensayos de fusión para la determinación del tiempo de fusión se realizaron siguiendo la metodología planteada en la sección 2.3.4.

Los parámetros que se mantuvieron constantes fueron la composición de la carga fundente correspondiente al 60 % de NaCl y 40 % KCl (obtenida de la sección 3.3.1), el porcentaje de carga fundente del 200 % (obtenida de la sección 3.3.2), la temperatura de fusión de 750 °C (obtenida de la sección 3.3.3).

En la Tabla 3.16, se indica el porcentaje de recuperación de la fase metálica obtenido para cada ensayo respecto al peso inicial de muestra sometida a fusión.

Tabla 3.16. Porcentaje de recuperación de Al metálico obtenido en la fusión de láminas para la determinación de la composición de carga fundente

Ensayo	Temperatura de fusión (h)	Masa Inicial (g)	Masa Recuperada (g)	Porcentaje de recuperación
20	0,25	2,05	0	0
21	0,50	2,02	0	0
22	0,75	2,00	0	0
23	1,00	2,00	0,28	14,00
24	1,25	2,03	0,61	30,67
25	1,50	2,01	1,18	58,97
26	1,75	2,07	1,35	65,01

En la Figura 3.28, se muestra el porcentaje de recuperación de la fase metálica respecto al tiempo que la muestra es sometida a procesos de fundición.

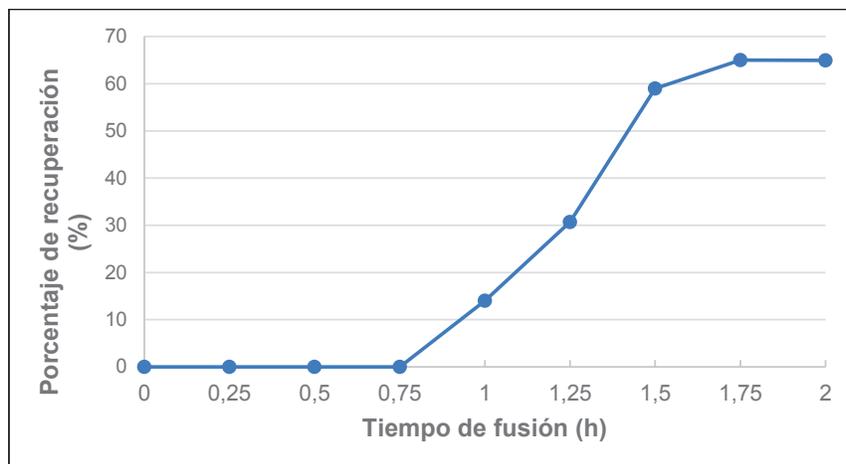


Figura 3.28. Porcentaje de recuperación de la fase metálica respecto al tiempo al realizar procesos de fundición de láminas de aluminio

Como se puede observar en la Figura 3.28, el porcentaje de recuperación de la fase metálica hasta las 0,75 h de fundición es igual a 0; a partir de este valor, el comportamiento es creciente respecto al tiempo hasta las 1,75 h, después la tendencia se vuelve constante.

El producto de fundición a las 0,25 h, 0,50 h y 0,75 h refleja que las sales no han sufrido ningún cambio de estado, conservan el color y textura. Además, las láminas permanecen compactadas como fueron ingresadas al crisol. Es decir son procesos ineficientes en los que no se logra la fusión. En la Figura 3.29, 3.30 y 3.31, se muestra el producto obtenido al fundir las láminas metálicas durante 1 h, 1,25 h y 1,50 h, respectivamente.



Figura 3.29. Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de láminas de Al como indica el Ensayo No.23

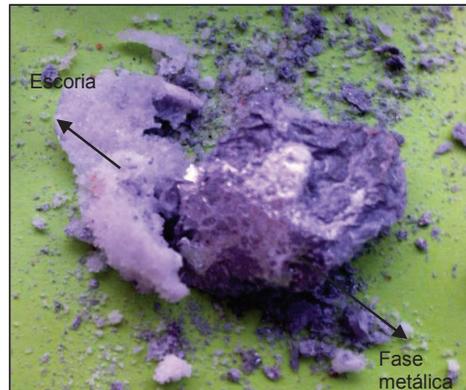


Figura 3.30. Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de láminas de Al como indica el Ensayo No.24

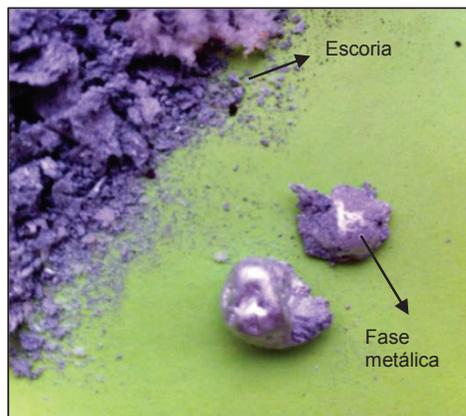


Figura 3.31. Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de láminas de Al como indica el Ensayo No.25

Como se puede observar, a partir de las 0,75 h de fundición se tiene el apareamiento de una fase metálica con brillo metálico característico del aluminio. Además, las sales fundentes presentan una tonalidad opaca lo cual refleja que han sido fundidas.

En la Figura 3.32, se muestra el producto de fundición de láminas de aluminio realizado durante 1,75 h, para el cuál la recuperación fue de 65,01 %. Como se puede observar el producto tiene características metálicas. Si se compara el porcentaje de recuperación obtenido para la fundición realizada bajo las mismas condiciones durante 2 h (64,94 %), el resultado es prácticamente el mismo. Por lo tanto, no es necesario incurrir en gastos energéticos durante más tiempo ya que la recuperación se mantiene constante.

Por tanto, el tiempo de fusión de láminas de aluminio para lograr la mayor recuperación es de 1,75 h, valor que será utilizado en ensayos posteriores.

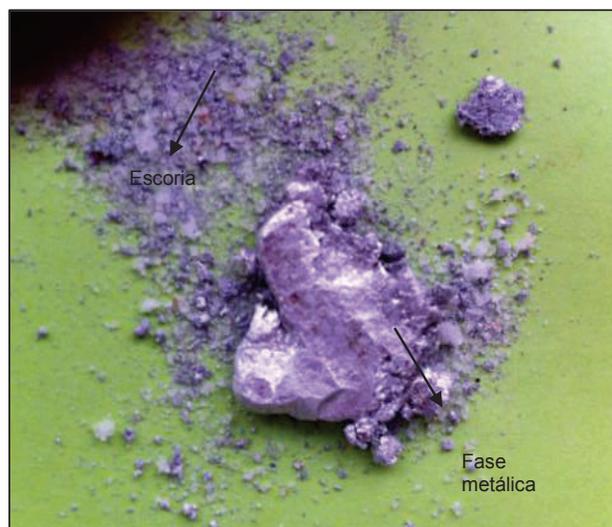


Figura 3.32. Fotografía del producto obtenido al realizar el proceso de fusión de láminas de Al como indica el Ensayo No.26

3.3.5 RESULTADOS DE LA INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE FLOURURO DE POTASIO (KF)

Los ensayos de fusión para la determinación del porcentaje de carga fundente, se realizaron siguiendo la metodología planteada en la sección 2.3.5.

Los parámetros que se mantuvieron constantes fueron la composición de la carga fundente correspondiente a 60 % de NaCl y 40 % de KCl (obtenida de la sección 3.3.1), el porcentaje de carga fundente de 200 % (obtenida de la sección 3.3.2), la temperatura de fusión de 750 °C (obtenida de la sección 3.3.3) y el tiempo de fusión de 1,75 h (obtenida de la sección 3.3.4). En la Tabla 3.17, se indica el porcentaje de recuperación obtenido para cada ensayo respecto al peso inicial de muestra sometida a fusión.

Tabla 3.17. Porcentaje de recuperación de Al metálico obtenido en la fusión de láminas para la determinación de la composición de carga fundente

Ensayo	Composición molar de sales			Masa Inicial (g)	Masa Recuperada (g)	% de Recuperación
	% NaCl	% KCl	%KF			
27	47,5	47,5	5	2,09	1,34	64,25
28	45	45	10	2,04	1,31	64,04

Como se observa en la Tabla 3.17, la adición de KF a la composición de las sales utilizadas como carga fundente, no reporta mayor variación respecto al valor obtenido en su ausencia (65,01 %).

Según bibliografía, la adición de KF a la carga fundente permite la disminución de la tensión interfacial provocada entre la mezcla de sales y el aluminio fundido, y esto conlleva a un recubrimiento del metal que a su vez permite una mayor recuperación de aluminio metálico (Totten y Mackenzie, 2003, p.128). Sin embargo, en los ensayos realizados no se evidencia ningún cambio, esto puede ser explicado por debido a la diferencia entre los puntos de fusión entre el KF y la mezcla NaCl – KCl, lo cual provoca la dificultad de formar una capa de revestimiento que impida la oxidación del Al.

3.3.6 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICO DEL ALUMINIO OBTENIDO

3.3.6.1 Caracterización química del aluminio obtenido

El material metálico producto de la fundición fue analizado químicamente para evaluar su composición. El análisis se realizó mediante espectrofotometría de chispa en el equipo Bruker Q4 TASMÁN en el laboratorio del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional. La preparación de la muestra consistió en lograr una sección pulida del material.

En la Tabla 3.18 se muestran los resultados reportados por espectrofotometría de chispa del producto obtenido por fundición utilizando una composición molar de sales de 60 % NaCl y 40 % KCl, 200 % de carga fundente a 750 °C durante 1,75 h.

Tabla 3.18. Análisis químico del material metálico producto de la fundición

Elemento	Contenido (%)
Aluminio (Al)	98,45
Hierro (Fe)	0,76
Silicio (Si)	0,60
Manganeso (Mn)	0,02
Zinc (Zn)	0,03
Titanio (Ti)	0,02
Sodio (Na)	0,02

El análisis químico muestra que el producto de fundición posee 98,45 % de Al y 0,76 % de Fe como elementos principales. Esto demuestra un alto contenido del metal que fue sometido a recuperación.

Los análisis químicos de la fase metálica tanto en la materia prima, como en el producto lixiviado y el producto de fusión, son de aproximadamente el 98,5 % es decir no se tiene mayor variación en la pureza del elemento de interés. Respecto a las impurezas del material, principalmente el hierro, se observa que se logra tener una disminución del 1,15 % al 0,76 %.

Además, los procesos de fundición han permitido que se reduzcan los elementos metálicos que se presentan como impurezas dentro de la materia prima. Por tanto, en el producto fundido ya no se reportan valores de Mg, P, B y Cu.

En la Figura 3.33, se muestra una fotografía del producto metálico obtenido a 355 aumentos en el microscopio electrónico de barrido (MEB), mediante el uso del software VEGA-TESCAN, con microanalizador de rayos X BRUKER. Como se puede observar el material presenta uniformidad en la superficie, lo que indica una buena fusión. Las grietas que se muestran son el resultado del proceso de lijado.

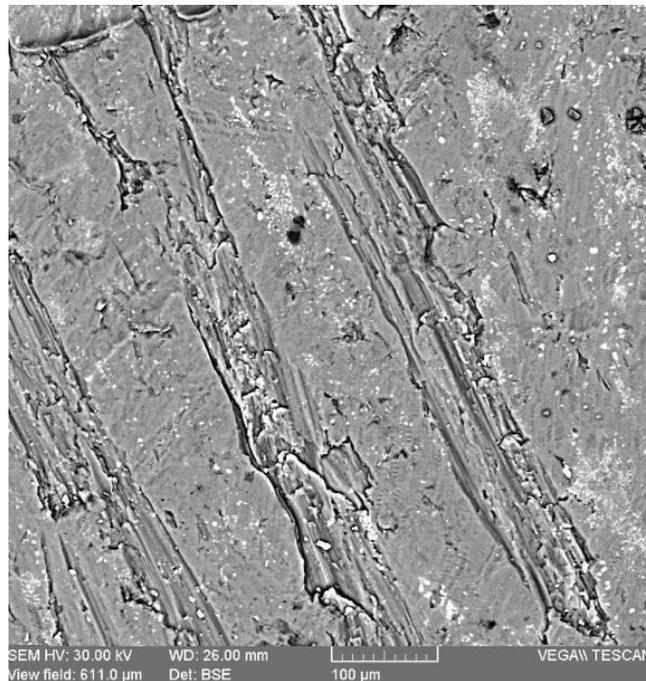


Figura 3.33. Imagen reportada por microscopía electrónica a 355 aumentos de una muestra de aluminio fundido

En la Figura 3.34, se muestra la distribución de los elementos dentro de la superficie analizada. Como se observa, la mayor cantidad de material corresponde a Al con la presencia de impurezas de Fe distribuidos de forma uniforme dentro de la muestra.

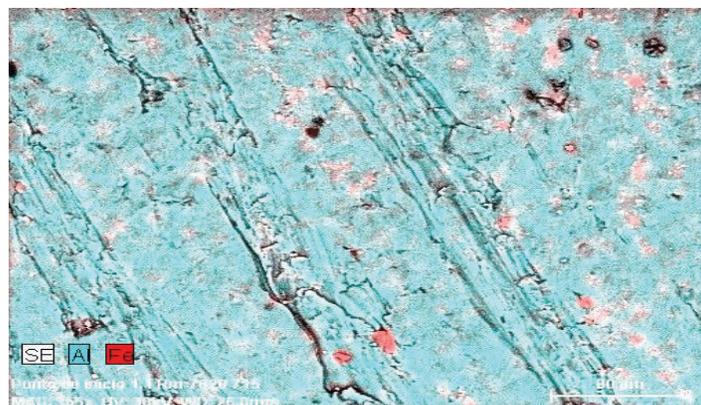


Figura 3.34. Imagen reportada por microscopía electrónica al realizar análisis semicuantitativo de una muestra de aluminio fundido (355x)

En la Figura 3.35, se muestra la imagen microscópica del producto metálico obtenido a 1000x aumentos. Como se puede observar, se ha centrado el análisis

sobre una zona de impureza, la cuál ha sido sometida a análisis semicuantitativo para determinar su composición.

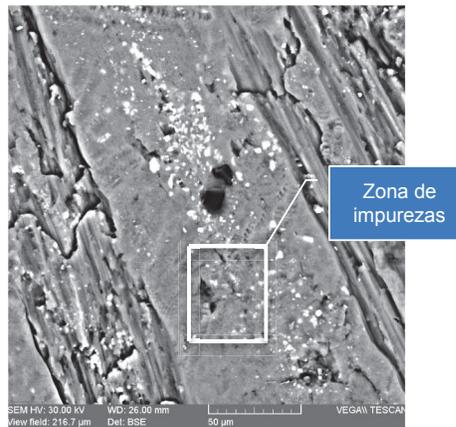


Figura 3.35. Imagen reportada por microscopía electrónica a 1000x aumentos de una muestra de aluminio fundido

En la Figura 3.36 se muestra la distribución de los elementos dentro de la superficie analizada, las impurezas corresponden a la presencia de C y O dentro de la muestra. La zona de impurezas marcada en la Figura 3.35, fue sometida a análisis químico puntual, se reportaron valores de 51,57 % de Al, 44,30 % de O y 3,51 % de C. La presencia de carbón se explica por impurezas presentes en el proceso de fusión que se adhieren al producto obtenido; por su parte, el oxígeno evidencia la presencia de óxidos.

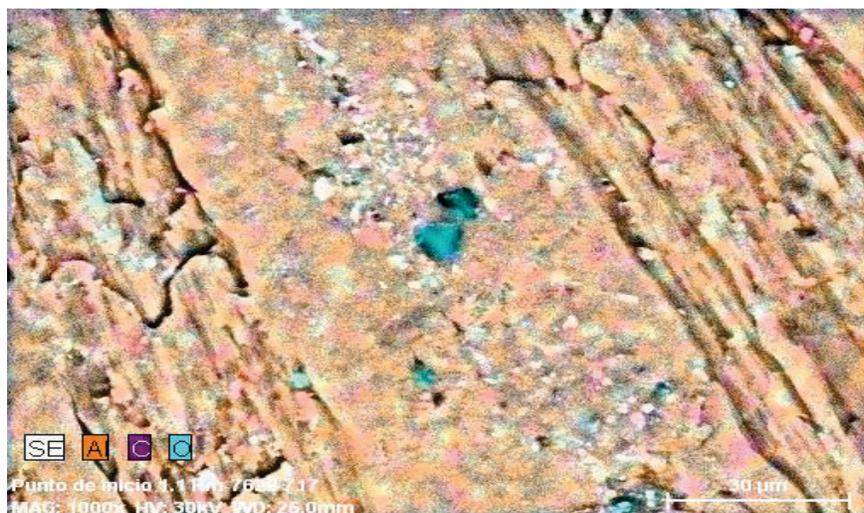


Figura 3.36. Imagen reportada por microscopía electrónica al realizar análisis semicuantitativo de una muestra de aluminio fundido (1000x)

3.3.6.2 Resultados de la caracterización mineralógica del aluminio obtenido

La caracterización mineralógica del producto fundido fue realizada para determinar la naturaleza de los componentes. En la Figura 3.37, se muestra el difractograma obtenido por en el equipo D8 Advance Bruker. La cualificación y cuantificación de cada uno de los compuestos presentes en la muestra se determinó mediante el uso de los softwares EVA y TOPAS.

De acuerdo al difractograma obtenido, la posición de los picos corresponden a aluminio metálico.

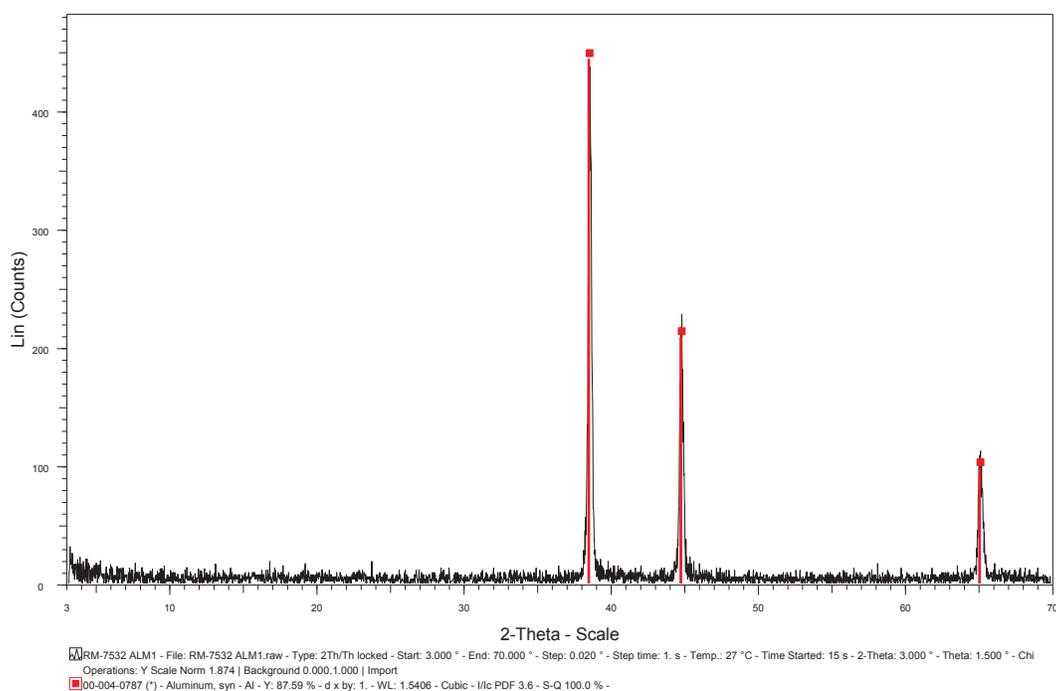


Figura 3.37. Difractograma de rayos X del producto metálico obtenido por fundición

La evaluación cuantitativa realizada por difracción de rayos X, reporta un valor de aluminio metálico del 99 %. Debido a la precisión del equipo correspondiente al 1 % es imposible la cuantificación de compuestos o elementos que tengan valores menores. Sin embargo, presenta una buena aproximación de la calidad y pureza del producto obtenido por fundición.

3.4 RESULTADOS DE LA DEFINICIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO Y SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS NECESARIOS PARA EL PROCESAMIENTO DE 5 t DE EMPAQUES FARMACÉUTICOS AL MES

La planta de recuperación de aluminio se diseñó para procesar 5 t de empaques farmacéuticos tipo *blister* al mes. Este valor considera que existe una tendencia creciente de consumo de este tipo de empaque en el mercado.

Con base en los resultados experimentales obtenidos en las secciones 3.1, 3.2 y 3.3 se realizaron los balances de masa y energía para la determinación de los diagramas BFD y PFD, estos fueron realizados bajo la normativa ANSI Y32.11 para la elaboración de diagramas de flujo de procesos industriales.

Posteriormente, se realizó el dimensionamiento y selección de los equipos necesarios para el funcionamiento de la planta de recuperación de aluminio, entre los cuales se tiene principalmente: tanque de lixiviación, prensa, destilador de solvente y horno eléctrico. Además, se establece la distribución de los mismos dentro de la planta y las vías de movimiento dentro de las instalaciones.

El diseño de la planta fue diseñado para una operación mensual de 20 días, cada uno con 8 h de operación. Por tanto, se requiere un tratamiento de 250 kg de empaques farmacéuticos al día.

3.4.1 RESULTADO DEL DIAGRAMA BFD DEL PROCESO PLANTEADO

El diagrama BFD, por sus siglas en inglés: Block flow diagram, es un instrumento que permite la visualización del proceso. Las operaciones unitarias se colocan dentro de bloques y se señalan las entradas y salidas mediante flechas. El diagrama BFD de la planta de recuperación de aluminio se presenta en la Figura 3.38.

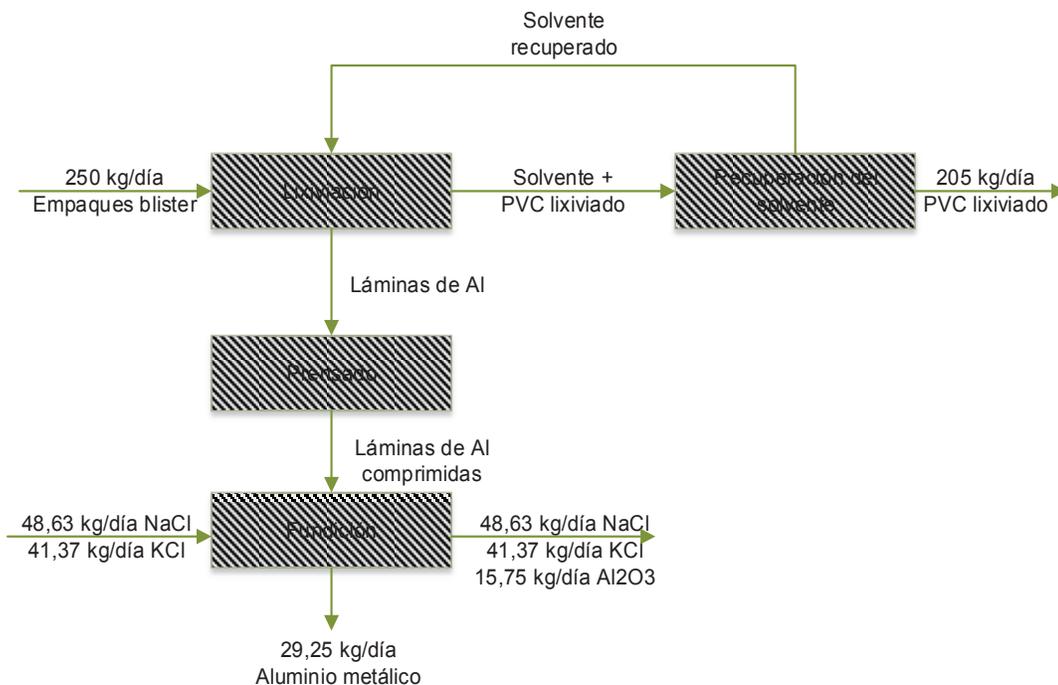


Figura 3.38 Diagrama BFD de la planta de recuperación de aluminio de los empaques tipo *blister* usados por la industria farmacéutica

Como se observa en el diagrama BFD, el proceso inicia con la separación de la capa metálica de la polimérica, mediante lixiviación. Para esto se utiliza como solvente de PVC acetato de n-butilo al 98 %. Una vez que los componentes del empaque tipo *blister* han sido separados, éstos pasan a un proceso de tamizado que permite la separación física de las láminas de aluminio del material plástico disuelto en el solvente. Las láminas metálicas son prensada antes de ser sometidas a procesos de fundición con sales de cloro. De forma paralela, el producto de lixiviación (PVC + solvente), se somete a destilación para recuperar el agente lixivante, éste podrá ser recirculado en futuras lixivaciones. Los cálculos de cada una de las corrientes se detallan en el Anexo VI.

3.4.2 RESULTADO DEL DIAGRAMA PFD DEL PROCESO PLANTEADO

El diagrama de PFD, por sus siglas en inglés: Process flow diagram, es un instrumento que permite la visualización de las interconexiones de los procesos e

incluye los resultados de los balances de masa del sistema. Los cálculos de cada una de las corrientes se detallan en el Anexo VI.

3.4.2.1 Simbología utilizada en el diagrama PFD

En la Tabla 3.19 se presenta la simbología utilizada en el diagrama PFD de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*.

Tabla 3.19. Simbología del diagrama PFD de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*

Símbolo	Descripción
	Temperatura
	Número de corriente
	Entrada y salida al proceso

El diagrama PFD de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister* se presenta en la Figura 3.39.

Tabla 3.20. Nomenclatura de los equipos del diagrama PFD de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*

Equipo	Código
Tanque de lixiviación	TK-101
Destilador	D-102
Prensa	PR-103
Horno de Fusión	H-104

Tabla 3.21. Composición de corrientes del diagrama PFD de la planta de recuperación de aluminio de empaques usados por la industria farmacéutica

Composición/ Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8
Estado	S	L	S+L	L	S	S	S	S
Temperatura (K)	298	298	298	298	298	298	298	298
Flujo Másico (kg/día)	250	1000	1205	980	205	20	45	45
Láminas de Al	45	-	-	-	-	-	45	45
PVC	205	-	205	-	205	-	-	-
Acetato de n-butilo	-	1000	1000	980	-	20	-	-
Composición/ Corriente	9	10	11	12	13	14	15	
Estado	S	L	S	V	L	V	L	
Temperatura (K)	298	298	298	373	373	373	373	
NaCl	48,63	-	-	-	-	-	-	
KCl	41,37	-	-	-	-	-	-	
Escoria de fundición	-	100,75	-	-	-	-	-	
Al metálico	-	-	29,25	-	-	-	-	
NaCl	48,63	-	-	-	-	-	-	
Vapor Saturado	-	-	-	864,96	-	864,96	-	
Vapor Condensado	-	-	-	-	864,96	-	864,96	

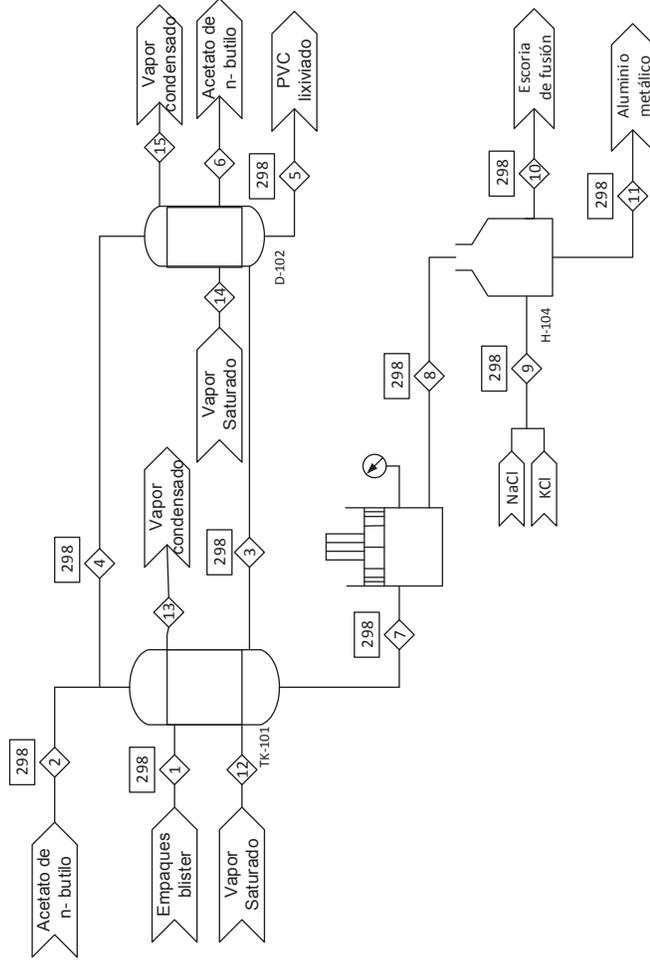


Figura 3.39. Diagrama PFD de la planta de recuperación de aluminio de los empaques tipo *blister* usados por la industria farmacéutica

3.4.3 RESULTADOS DEL DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS

3.4.3.1 Resultados del dimensionamiento del tanque de lixiviación

De acuerdo a los resultados presentados en la sección 3.2, el proceso de lixiviación de los empaques farmacéuticos tipo *blister* debe realizarse durante 150 min usando acetato de n-butilo al 98 % como agente disolvente del PVC.

Con base en el trabajo realizado por Estrella (2013), la proporción másica entre el material de entrada y el solvente es de 1 a 4, respectivamente. Es decir, para el procesamiento de 250 kg de empaques farmacéuticos se requiere 1000 kg de acetato de n-butilo.

El tanque que se utiliza en este proceso requiere un sistema de calentamiento hasta la temperatura de ebullición del acetato de n-butilo (126 °C) para lograr la disolución del PVC y tener como producto las láminas de aluminio. Para esto se utiliza vapor generado de una caldera.

El volumen total del tanque esta dado por el volumen del solvente y el volumen que ocupan los empaques, éste ultimo se calcula con la densidad relativa del material como se muestra en la ecuación 3.1.

$$V = m \times \frac{1}{\delta} \quad [3.1]$$

Donde:

V =Volumen de acetato de n-butilo/empaques *blister*

m = masa de acetato de n-butilo/empaques *blister*

δ =Densidad de acetato de n-butilo/empaques *blister*

$$1000 \text{ kg de acetato de n butilo} \times \frac{1 \text{ m}^3}{882,5 \text{ kg}} = 1,1331 \text{ m}^3 \text{ de acetato de n - butilo}$$

$$250 \text{ kg de empaques blister} \times \frac{1 \text{ m}^3}{67,40 \text{ kg}} = 3,7092 \text{ m}^3 \text{ de empaques blister}$$

Se requiere que el tanque de lixiviación sea de 5 m³. El diseño del tanque se realiza bajo el criterio que la altura del tanque sea el doble de su diámetro. El material del tanque de lixiviación debe ser necesariamente acero inoxidable, debido a que el solvente empleado puede ocasionar corrosión. En la Tabla 3.22, se presenta las características del tanque seleccionado. La información detallada se muestra en el Anexo VII.

Tabla 3.22. Características del tanque de lixiviación

Capacidad (m³)	2,5
Diámetro (m)	1,2
Altura (m)	2,2

Debido a la capacidad del tanque seleccionado el proceso de lixiviación se realiza por cargas, un total de dos por cada día.

3.4.3.2 Resultados para el dimensionamiento del destilador para la recuperación del solvente

El equipo de recuperación de solvente se requiere para el tratamiento del residuo que se genera de lixiviación. Éste se compone de solvente y material polimérico, en una carga de lixiviación se genera 500 kg acetato de n-butilo y 102,5 kg de PVC lixiviado. El volumen total del tanque esta dado por el volumen del solvente y el volumen que ocupan los empaques, éste ultimo se calcula con la densidad real del material empleando la ecuación 3.1

$$500 \text{ kg de acetato de n butilo} \times \frac{1 \text{ m}^3}{882,5 \text{ kg}} = 0,5666 \text{ m}^3 \text{ de acetato de n – butilo}$$

$$102,5 \text{ kg de PVC} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1400 \text{ kg}} = 0,0732 \text{ m}^3 \text{ de PVC}$$

El volumen total del equipo de destilación que se requiere es de 0,7 m³. En la Tabla 3.23, se presentan las características del sistema seleccionado. La Información completa se muestra en el Anexo VII.

Tabla 3.23. Características del destilador para la recuperación del solvente

Capacidad (m³)	1
Altura (m)	2,1
Diámetro (m)	3,1

3.4.3.3 Resultados del dimensionamiento de la prensa hidráulica

Debido a la alta reactividad del aluminio, las láminas obtenidas por lixiviación deben ser prensadas previamente a su fundición.

El dimensión de la prensa se es selecciona con base en la cantidad de material proveniente de la operación anterior. El producto metálico de las dos cargas diarias es de 45 kg/día de láminas de aluminio. En la Tabla 3.24, se presentan las características del sistema seleccionado. La Información completa se muestra en el Anexo VII.

Tabla 3.24. Características de la prensa hidráulica

Capacidad (kg)	60
Potencia (kW)	1,5
Tiempo de compactación (s)	24

3.4.3.4 Resultados del dimensionamiento del horno eléctrico

Con base a los resultados presentados en la sección 3.3, el proceso de fundición de las láminas de aluminio provenientes de los empaques farmacéuticos tipo *blister* debe realizarse durante 1,75 h con una la composición molar de la carga fundente

correspondiente a 60 % de NaCl y 40 % de KCl, el porcentaje de carga fundente es del 200 % y la temperatura de fusión de 750 °C. De acuerdo a los balances de masa y energía realizados la carga está compuesta por 45 kg de láminas de aluminio, 48,63 kg de NaCl y 41,37 kg de KCl. Es decir, la carga total que ingresa a fusión es de 90 kg por día.

Se requiere trabajar con un horno de tipo eléctrico de temperatura controlable. El equipo se seleccionó bajo condiciones de catálogo. En la Tabla 3.25, se presenta las características del horno seleccionado. La Información completa se detalla en el Anexo VI.

Tabla 3.25. Características del horno de fusión

Capacidad (kg)	150
Potencia (kW)	25
Voltaje (V)	380
Temperatura máxima de trabajo (°C)	780

3.4.3.5 Balance de energía

Los equipos de lixiviación y recuperación de solvente requieren trabajar con vapor a condiciones de saturación. Para determinar el gasto de combustible empleado en la operación del caldero se realizó un balance de materia y energía dentro del equipo. De acuerdo al equipo seleccionado de catálogo el combustible a ser empleado sería GLP. Los cálculos realizados para la determinación de la demanda de vapor se especifican en el Anexo VI.

3.4.4 DISTRIBUCIÓN DE EQUIPOS EN PLANTA

De acuerdo a la selección de equipos se planteó su distribución dentro de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos.

En la Figura 3.40, se muestra la vista superior de la planta y en la Figura 3.41 las vías de movimiento dentro de la misma.

3.4.5 PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Una vez que se ha realizado la selección y distribución de los equipos en planta es posible realizar una planificación de la producción diaria de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*. Como se había especificado anteriormente, la jornada diaria de trabajo es de 8 horas de 8 am a 5 pm. Se tiene una hora de almuerzo de 12 am a 1 pm. En la Figura 3.42 se muestra la planificación diaria para cada equipo de la planta.

	8 am	9 am	10am	11 am	12am	1 pm	2 pm	3 pm	4 pm	5 pm
Arranque de equipos	X				Almuerzo					
Lixiviación de PVC		x	x	x		x	x	X		
Prensado de láminas de Al										X
Fusión de láminas de Aluminio							X	x	X	
Recuperación del solvente		x	x	x			x	x	X	

Figura 3.42. Planificación de la producción de la planta de recuperación de aluminio de los empaques tipo *blister* usados por la industria farmacéutica

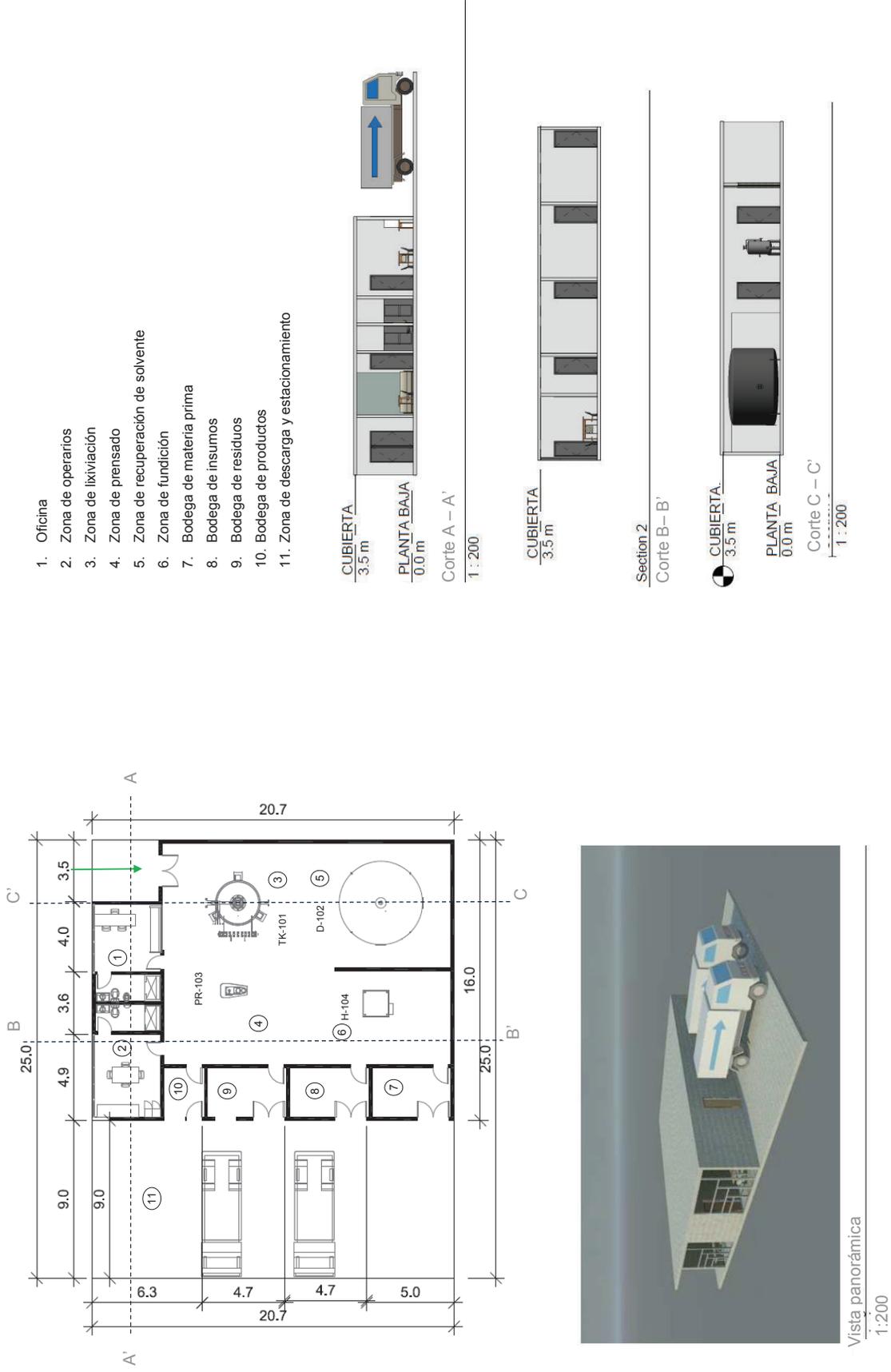


Figura 3.40. LAY OUT y cortes de la planta de recuperación de aluminio de los envases tipo *blister* usados por la industria farmacéutica

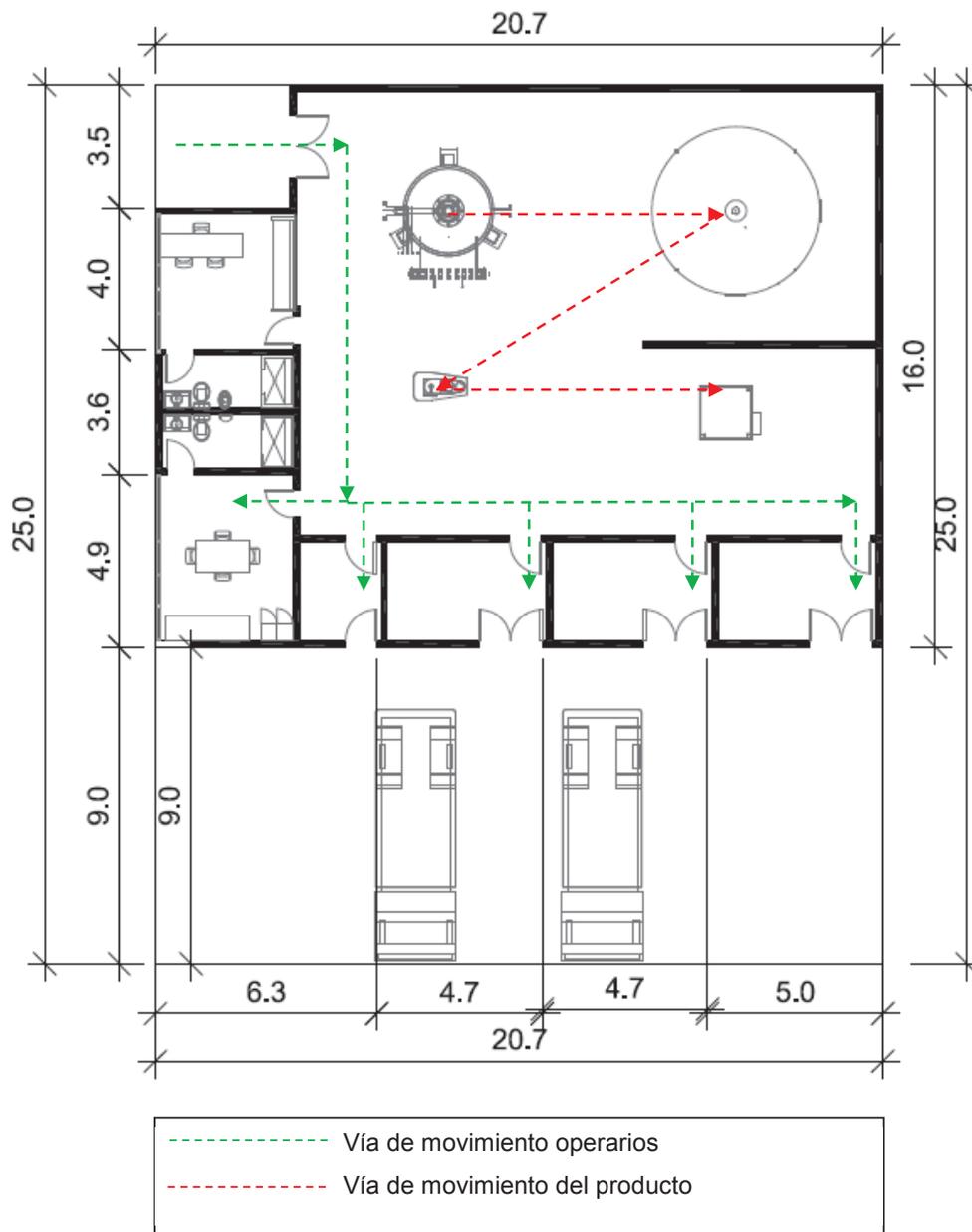


Figura 3.41. Vías de movimiento dentro de la planta de recuperación de aluminio de los empaques tipo *blister* usados por la industria farmacéutica

3.5 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA CON CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE 5 t DE EMPAQUES FARMACÉUTICOS AL MES

A continuación se presenta el análisis económico de prefactibilidad del proyecto para la instalación de una planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*.

Los datos se han planteado con base a una capacidad de procesamiento de 5 t/mes de acuerdo a los datos obtenidos en la sección 3.2, 3.3 y 3.4. El costo de la materia prima se considera depreciable ya que proviene de residuos.

3.5.1 COSTOS DE INVERSIÓN

Los activos de inversión del proyecto están dados por los costos de la maquinaria y reactivos para la puesta en marcha de la planta.

En la tabla 3.26, se presenta un desglose de los valores correspondientes al costo de los equipos utilizados, éstos fueron estimados y obtenidos de referencias comerciales de equipos que cumplen con las características seleccionadas en la sección 3.4.3.

Tabla 3.26. Costo de los equipos para la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*

Equipos	Unidades	Costo Equipos (\$)	Costo Total (\$)
Tanque de lixiviación	1	4 000	4 000
Destilador	1	2 500	2 500
Prensa hidráulica	1	2 500	2 500
Horno eléctrico	1	10 000	10 000
Caldero	1	6 500	6 500
		Total (\$)	25 500

Los costos de los reactivos para el arranque de la planta se presentan en la Tabla 3.27, dentro de los que se incluye el solvente de lixiviación y los reactivos de fusión.

Tabla 3.27. Costo de insumos para el arranque de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*

Materia Prima	Cantidad (kg)	Costo por peso (\$/kg)	Costo Total (\$)
Acetato d n-butilo	1000	0,8	800
NaCl	11 671,2	0,1	1 167,12
KCl	9 928,8	0,2	1 985,76
Total			3 952,88

Como se observa en las Tablas 3.26 y 3.27 la inversión por adquisición de maquinaria es de \$ 25 500 y el costo de reactivos para el arranque es de \$ 3 952,88. No se consideran los costos del terreno y edificaciones ya que el montaje de los equipos se realiza dentro de una planta en funcionamiento.

3.5.2 COSTOS FIJOS

Los costos fijos están determinados por los salarios del personal y el mantenimiento de los equipos.

La planta de recuperación de aluminio de empaques farmacéuticos tipo *blister*, requiere de 2 operarios que trabajen en una jornada única de 8 horas. Dentro del análisis económico, no se estima costos generados por la contratación de un jefe de producción debido a que el análisis se realiza sobre una planta en funcionamiento que suma este tratamiento de residuos a sus servicios actuales.

Dentro de los salarios se considera el aporte al IESS, los fondos de reserva, décimo tercero, décimo cuarto y vacaciones, cumpliendo con los derechos establecidos por el Ministerio de Relaciones Laborales.

En la tabla 3.28, se muestra el costo total anual generado por los salarios al personal.

Tabla 3.28. Costos fijos generados por salarios de personal de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*

Cargo	Salario (Mensual)	Aporte al IESS (mes)	Fondo de Reserva (mes)	Décimo tercer (Anual)	Décimo cuarto (Anual)	Vacaciones (Anual)	Total (Anual)
Operarios (2)	340,0	37,9	28,3	340,0	340,0	340,0	11 789,57
						Total (\$/año)	11 789,57

Como se puede observar se tiene una suma de \$ 11 789,57 al año, al trabajar con 2 operarios dentro de la planta de recuperación de aluminio.

Por su parte, el costo de mantenimiento anual de los equipos se considera el 2 % de la inversión de los equipos definidos en la sección 3.5.1.

En la Tabla 3.29, se muestra los costos fijos generados por salarios y por el mantenimiento de los equipos de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*.

Tabla 3.29. Costos fijos generados en la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*

Gastos	Costo Anual (\$)
Salarios	11 789,57
Mantenimiento	510
Total	12 299,57

3.5.3 COSTOS VARIABLES

Los costos variables están determinados por los valores generados por la adquisición de insumos y los servicios industriales, que corresponden a: los reactivos para la lixiviación (acetato de n-butilo) y la fusión (NaCl y KCl), en proporciones definidas en la sección 3.3, el solvente utilizado (acetato de n-butilo), que se recupera dentro de la planta; sin embargo, se considera un la adquisición de 4 400 kg/año debido a pérdidas en el proceso de lixiviación.

En la tabla 3.30, se muestra el costo anual generado por la compra de insumos de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques tipo *blister*.

Tabla 3.30. Costos variables generados por compra de insumos de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*

Materia Prima	Cantidad (kg/año)	Costo por peso (\$/kg)	Costo Total (\$)
Acetato d n-butilo	4400	0,6	2 640
NaCl	11 671,2	0,1	1 167,12
KCl	9 928,8	0,2	1 985,76
Total			5 792,88

En la tabla 3.31, se muestra el costo anual generado por el consumo de energía eléctrica por parte de los equipos de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques tipo *blister*.

Tabla 3.31. Costos variables generados por consumo energético de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*

Maquinaria	Unidades	Potencia (kW)	Tiempo de Operación (h/año)	Energía Consumida (kW-h/año)
Prensa Hidráulica	1	1,50	1,60	2,40
Horno eléctrico	1	25,00	420,00	10 500,00
Consumo Energético anual (KW-h/año)				16 382,40

El consumo energético anual por operación de la maquinaria de la planta es de 16 382,40 kWh/año. A este valor se incrementa el 20 % debido a energía requerida para la operación de la planta, los costos por adquisición de GLP y agua para el funcionamiento de la planta, obteniendo el costo total por consumo energético.

Finalmente, en la Tabla 3.32, se muestra los costos variables totales generados en la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques tipo *blister*. Los ejemplos de cálculo se muestran en el Anexo VIII.

Tabla 3.32. Costos variables totales generados en la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*

Gastos	Costo anual (\$/año)
Consumo energético	840,19
GLP	1103,62
Agua	29,05
Materia Prima	5 792,88
Total (\$/año)	8 160,31

3.5.4 INGRESOS POR VENTA DEL PRODUCTO

Los ingresos se generan por el aluminio producido y el residuo de PVC. En la tabla 3.33, se muestra el valor generado por ventas de productos de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*.

Tabla 3.33. Ingresos generados por venta del producto de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*

Producto	Cantidad (t/año)	Precio (\$/t)	Total (\$/año)
Aluminio	7,02	3 000	21 060
Residuo de PVC	48	100	4 800
		Total	25 860

3.5.5 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA DE UNA PLANTA CON CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE 5 t DE EMPAQUES FARMACÉUTICOS AL MES.

Con base en los valores planteados en la sección 3.5.1, 3.5.2 y 3.5.3, se realizó el flujo de caja con una proyección a 10 años de operación de la planta con el fin de evaluar los indicadores económicos: tasa interna de retorno (TIR), valor actual neto (VAN) y relación beneficio costo (B/C).

Los indicadores económicos permiten evaluar la rentabilidad de la planta dentro del mercado de análisis bajo el cual se realiza el estudio.

Para el año 0 o tiempo de arranque, no se considera valores de ingresos por ventas, costos variables, costos fijos, intereses y depreciación. Únicamente se registra el valor correspondiente a la inversión y capital de trabajo. A partir del año 1, los valores mencionados anteriormente son considerados.

El valor de la maquinaria no se considera dentro del flujo de caja ya que se asume que los equipos han sido adquiridos con anterioridad; por tanto, el valor correspondiente a la inversión corresponde al costo de insumos requerido para el arranque de la planta.

En la tabla 3.34, se muestra el flujo de caja correspondiente a 10 años de funcionamiento de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*.

Como se puede observar, los valores de flujo neto para todos los años exceptuando el número 0 son positivos, es decir a partir del primer año se recibe utilidades del funcionamiento de la planta. Esto predice que los indicadores económicos que se calculan posteriormente determinarán procesos rentables.

Tabla 3.34. Flujo de caja de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos por Ventas		25 860,00	25 860,00	25 860,00	25 860,00	25 860,00
Costos Variables		-8 160,31	-8 160,31	-8 160,31	-8 160,31	-8 160,31
Costos Fijos		-12 299,57	-12 299,57	-12 299,57	-12 299,57	-12 299,57
Utilidad Bruta		5 400,12	5 400,12	5 400,12	5 400,12	5 400,12
Utilidades antes de Impuestos		5 400,12	5 400,12	5 400,12	5 400,12	5 400,12
Impuestos (20 %)		1 080,02	1 080,02	1 080,02	1 080,02	1 080,02
Utilidad Neta		4 320,10	4 320,10	4 320,10	4 320,10	4 320,10
Inversiones	-3 952,88					
Capital de Trabajo	-10 229,94					
Flujo Neto	-14 182,82	4 320,10	4 320,10	4 320,10	4 320,10	4 320,10
Valor Actual	-14 182,82	3 927,36	3 570,33	3 245,75	2 950,69	2 682,44

Tabla 3.34. Flujo de caja de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister* (**continuación...**)

	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Ingresos por Ventas	25 860,00	25 860,00	25 860,00	25 860,00	25 860,00
Costos Variables	-8 160,31	-8 160,31	-8 160,31	-8 160,31	-8 160,31
Costos Fijos	-12 299,57	-12 299,57	-12 299,57	-12 299,57	-12 299,57
Utilidad Bruta	5 400,12	5 400,12	5 400,12	5 400,12	5 400,12
Utilidades antes de Impuestos	5 400,12	5 400,12	5 400,12	5 400,12	5 400,12
Impuestos (20 %)	1 080,02	1 080,02	1 080,02	1 080,02	1 080,02
Utilidad Neta	4 320,10	4 320,10	4 320,10	4 320,10	4 320,10
Inversiones					
Capital de Trabajo					
Flujo Neto	4 320,10	4 320,10	4 320,10	4 320,10	4 320,10
Valor Actual	2 438,58	2 216,89	2 015,36	1 832,14	1 665,58

Con base en los datos obtenidos de flujo de caja durante 10 años de operación, se calcula los indicadores económicos VAN, TIR y la relación B/C de una planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*, presentados en la Tabla 3.35. El cálculo se muestra en el Anexo VIII.

Tabla 3.35. Indicadores económicos obtenidos para la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo *blister*

Indicador	Valor (\$)
Interés	10 %
VAN (\$)	12 362,31
TIR (%)	27,85
B/C	1,87

Como se puede observar en la Tabla 3.35, el valor actual neto reporta un valor positivo de \$ 12 362,31 y la tasa interna de retorno del 27,85 %. Esto permite establecer que el proceso es económicamente rentable bajo las condiciones de funcionamiento planteadas.

Finalmente, al analizar la relación beneficio/costo se obtuvo un valor de 1,87; es decir, además de recuperar la inversión se obtiene utilidad por el funcionamiento de la planta después de cierto tiempo de operación de la misma.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Los empaques farmacéuticos están compuestos por PVC como material polimérico y una lámina de metálica como material de cubierta. Poseen el 18 % de material metálico constituido por 98,65 % de Al y 1,15 % de Fe.

Los empaques tipo *blister* presentan una densidad real de 1,4176 g/cm³ y una densidad aparente de 0,0674 g/cm³, por lo que una pequeña cantidad ocupa un gran volumen.

El proceso de separación de la capa metálica de la polimérica requiere lixiviar los empaques farmacéuticos utilizando como solvente del PVC acetato de n-butilo al 98 % durante 150 min. Bajo dichas condiciones una pérdida de masa del empaque *blister* del 80,18 %; por tanto, el restante 19,82 % no lixiviado, correspondiente a la fase metálica.

El proceso de lixiviación utilizando como solvente acetona presenta una pérdida de masa del empaque del 80,41 %; es decir, el 19,59 % restante correspondiente al material metálico. Sin embargo, su uso se descarta debido a regulaciones en la comercialización del solvente.

Al utilizar solventes diluidos en la lixiviación de PVC, los procesos de separación de la capa metálica de la polimérica se vuelven ineficientes debido a la diferencia en los puntos de ebullición de los componentes.

El acetato de n-butilo recuperado por destilación puede ser recirculado al proceso de lixiviación. La eficiencia de separación no se ve alterada

Las condiciones de fundición planteadas para una recuperación del 65 % del aluminio metálico, establecen una composición molar de sales de 60 % NaCl y

40 % KCl, 200 % de carga fundente a 750 °C durante 1.75 h. El uso de sales como carga fundente determinan la recuperación de aluminio ya que inhiben la oxidación del mismo.

La adición de fluoruro de potasio (KF) a la carga fundente no incrementa el porcentaje de recuperación de la fase metálica durante los procesos de fusión. Esto se debe a la diferencia a la diferencia entre los puntos de fusión del KF y la mezcla NaCl-KCl.

El producto metálico analizado por espectrofotometría de chispa está compuesto por 98,45 % de Al y 0.76 % de Fe como elementos principales. De acuerdo al análisis realizado por DRX el 99 % del material corresponde a Al metálico.

De acuerdo al diseño realizado, la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos tipo blister, requiere como equipos principales: un tanque de lixiviación, una prensa hidráulica para compactar las láminas de aluminio previo al proceso de fundición, un horno eléctrico, un tanque de recuperación de solvente. La producción de vapor se realiza por medio de una caldera que proporciona el calor necesario para las etapas de lixiviación y destilación.

La propuesta planteada además de ser una alternativa técnica de recuperación de materiales de interés, representa una posible solución al problema medio ambiental de disposición de este tipo de residuos.

El estudio de pre factibilidad económica reporta un valor actual neto de \$ 12 362,31, una tasa interna de retorno del 27,85 % y una relación beneficio costo de 1,87. Por lo tanto, el proyecto es económicamente viable bajo las condiciones de funcionamiento planteadas.

4.2 RECOMENDACIONES

Realizar estudios sobre el tratamiento del material polimérico residual proveniente de los empaques tipo *blister*, con la finalidad de plantear una alternativa para su disposición y aprovechamiento.

Desarrollar el proceso de lixiviación y fusión a escala piloto para determinar la factibilidad a nivel industrial. Debido al aumento de volumen pueden presentarse dificultades en dichos procesos o cambios en las condiciones de trabajo.

Realizar estudios de mercado para determinar la factibilidad de recolección de una mayor cantidad de este tipo de residuos, de esta forma se puede incrementar la producción generando mayor utilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Al-Achi, A; Craig, W; Ram, M. (2013). *Integrated Pharmaceutics: Applied Preformulation, Product Design, and Regulatory Science*. (1era. ed.). New Jersey, Estados Unidos: Wiley.
2. Arias, T. (1999). *Glosario de Medicamentos: Desarrollo, evaluación y uso* (1era. Ed.). Washington, Estados Unidos.
3. Arias, L; Fernández, S., Portilla, L. (2010). Reciclaje de Maeriales no ferrosos, en busca de una producción mas limpia. Universidad Tecnológica de Pereira. *Scientia et Technica* Año XVII, No. 4. Recuperado de <http://200.21.217.140/index.php/revistaciencia/article/viewFile/237/97>, (mayo, 2015)
4. Asociación Europea de Aluminio (EAA), Organización de Refinadores y Refundidores de Aluminio de Europa (OEA). (2004) *Aluminum Recycling:Theroadtohighqualityproducts*.http://www.oeaalurecycling.org/de/verband/oea_eaa_aluminium_recycling.pdf. (Diciembre, 2013)
5. ASTM D3173-87. (1996). *Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*. Estados Unidos.
6. ASTM D3174-12. (2012). *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. Estados Unidos.
7. ASTM D3175-02. (2002). *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke*. Estados Unidos.
8. Bailon, R. (2011). Consumidas en los hornos hasta las raices. Recuperado de <https://sciunt.wordpress.com/2011/05/11/consumidas-en-los-hornos-hasta-las-raices/>, (mayo, 2015)

9. Belliveau, M. (2003). Dioxin pollution prevention and pvc plastic in municipal solid waste: Precautionary state policy. Recuperado de http://www.chej.org/ppc/docs/pvc_polyvinyl_chloride_or_vinyl/PVC_MBBEH.pdf (octubre, 2014)
10. Billmeyer, F. (1978). *Ciencia de los Polímeros*. (1era. ed.). Barcelona, España: Reverté.
11. Boeckenhauer, K. y Kaczmarczyk, T. (2008). *Modern Furnaces for aluminum scrap recycling*. Recuperado de <https://www.secowarwick.com/assets/Documents/Articles/Aluminium/MODERN- FURNACES- FOR- ALUMINIUM- SCRAP-RECYCLING-AP.pdf>, (mayo, 2015)
12. Boin U. M. J., y Bertram M. (2005) Melting Standardized Aluminum Scrap: A Mass Balance Model for Europe, JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. <http://springerlink.com/content/n08g88v6j5211p80/fulltext.pdf>. (December, 2013)
13. Cabrera, C. (2012). *Tecnologías emergentes y temas focales de investigación en la industrial del PVC*. Slap 2012. Bogota- Colombia.
14. Cisternas, L. (2009). *Diagramas de fases y su aplicación*. Barcelona, España: Reverté.
15. De la Torre, E., Guevara, A., Yépez, S. (2009). Influencia de sales de cloro y flour en el reciclaje de aluminio por fusión. Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX). Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5517/1/Ernesto-de-la-Torre-3.pdf>, (mayo, 2015)
16. DeGarmo, E. P., Black, J. T., Kohser, R. A. (1994). *Materiales y Procesos de Fabricación*. (2da. ed.). Barcelona, España: Reverté.

17. Endara, D. (2008). Recuperación de Aluminio de los envases y empaques usados por la Industria de Alimentos y Farmacéutica. (Tesis previa a la obtención de grado de Master en Metalurgia Extractiva y Medio Ambiente). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
18. Estrella, F. (2013). *Diseño de una planta para la recuperación de Aluminio de envases multicapa mediante lixiviación con solventes orgánicos y fundición*. . (Proyecto previo a la obtención de título de Ingeniero Químico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
19. Gadea, R., Romano, D. y Santos, T. (2008) Sustitución de sustancias disolventes peligrosas. España: Paralelo Edición, SA. Recuperado de <http://www.istas.ccoo.es/descargas/guia%20disolventes.pdf>, (octubre, 2014)
20. Gandía, L., Gil, A. (2004). Gestión de las escorias salinas de los procesos de segunda fusión del aluminio. Universidad Pública de Navarra. Recuperado de <http://www.idalsa.com/wpcontent/themes/idalsa/pdf/Gestion%20de%20escorias%20salinas%20de%20los%20procesos%20de%20segunda%20fusion%20del%20aluminio.pdf>, (mayo, 2015)
21. González, M. (1997). Propiedades químicas y propiedades físicas de los polímeros. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de http://ruc.udc.es/bitstream/2183/9641/1/CC_32_art_3.pdf, (octubre, 2014)
22. Granda, I. y Plaza, G. (2012). *Elaboración e implementación de un plan de manejo de residuos sólidos y vertidos líquidos industriales generados por la Corporación Ecuatoriana de Aluminio S.A. CEDAL*. (Proyecto previo a la obtención de grado Máster de Sistemas de Gestión Ambiental). Escuela Politécnica del Ejército, Quito, Ecuador.

23. Groover, M. (1997). Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas. (1era. ed.). México: Pearson.
24. Guilcamaigua, J. (2013). Diseño e implementación de una máquina semiautomática de termoformado con panel operador para la elaboración de empaques tipo blíster de un producto de la empresa metal arte guilcamaigua. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electromecánica). Escuela Politécnica del Ejército - Extensión Latacunga, Latacuna, Ecuador.
25. Nutsch, W. (2000). Tecnología de la Madera y el Mueble. (1era. ed.). España: Reverté.
26. Pérez, D. y Salazar, J. (2007). *Diseño de un MRP (Planificación de requerimientos de materiales), para la empresa CEDAL S.A. en el área de producción.* (Proyecto Previo a la obtención del título de Ingeniero Empresarial). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
27. Pilchik, R. (2000a). Pharmaceutical *Blister* Packaging, Part I: Rationale and Materials. *Pharmaceutical Technology*, 68-77. Recuperado de <http://www.pharmanet.com.br/pdf/blister.pdf> (septiembre, 2014)
28. Pilchik, R. (2000b). Pharmaceutical *Blister* Packaging, Part II: Machinery and Assembly. *Pharmaceutical Technology*, 56-60. Recuperado de <http://www.pharmanet.com.br/pdf/blister.pdf> (septiembre, 2014)
29. Rodríguez, J., Castro, L. y Del Real, J. (2006) Procesos industriales para materiales metálicos. (2da. ed.). Madrid, España: Vision Net.
30. Román, F. (1992). *Introducción a la recuperación y reciclado de los metales no férreo.* Instituto Tecnológico Geominero de España. (1era. ed.) Madrid, España.

31. Rubinos, D. (2007). Utilización de lodos rojos de bauxita en la contención e inactivación de residuos tóxicos y peligrosos. (Tesis Doctoral – Departamento de Edafología y Química Agrícola). Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España.
32. Saeed, L. (2004). Experimental assessment of two-stage combustion of high pvc solid waste with HCl recovery, Helsinki University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Finlandia. Recuperado de <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/2427/isbn9512271516.pdf?sequence=1>, (octubre, 2014)
33. Sánchez, H., Escobar, W., Echavarría, A., Ossa, C. y Escobar, D. (2007). Fusión por Plasma. Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de www.dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4802686.pdf, (Octubre, 2014)
34. Schlesinger, M. (2013). Aluminum Recycling (2da. ed.). New York, Estados Unidos: Taylor & Francis Group.
35. Tsakiridis, P. (2012). Aluminium Salt Slag Characterization and Utilization ñ A review. Journal of Hazardous Materials, 217-218. Grecia
36. Totten G. y MacKenzie D. (2003). "Handbook of Aluminum", Editorial Marcel Dekker, Inc., Nueva York, Estados Unidos, Volumen 1, pp.36-37, Volumen 2, pp.116-165.
37. Universidad Católica Argentina UCA. (2008). El PVC: Policloruro de Vinilo. Recuperado de <http://estudiodoyensayo.files.wordpress.com/2008/11/pvc.pdf>, (octubre, 2014)
38. VinyLoop. (2013). The VinyLoop Process. Recuperado de <http://www.vinyloop.com>, (octubre, 2014).

39. Weissermel, K. y Arpe, H. (1981). *Química Orgánica Industrial: Productos de partida e intermedios mas importantes*. Barcelona, España: Reverté S.A.
40. Yépez, S. (2010). *Reciclaje de Aluminio a partir de desechos industriales y electrónicos, mediante fusión en presencia de sales de cloro y flúor*. (Proyecto previo a la obtención de título de Ingeniero Químico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
41. Granda, I. y Plaza, G. (2012). *Elaboración e implementación de un plan de manejo de residuos sólidos y vertidos líquidos industriales generados por la Corporación Ecuatoriana de Aluminio S.A. CEDAL*. (Proyecto previo a la obtención de grado Máster de Sistemas de Gestión Ambiental). Escuela Politécnica del Ejército, Quito, Ecuador.
42. Zeverhoven, R. y Saeed, L. (2000). Two-stage combustion of high-PVC solid waste with HCl recovery, Helsinki University of Technology. Recuperado de <http://www.environmentalexpert.com/Files%5C22110%5Carticles%5C2081%5Ctwo-stage.pdf>, (octubre, 2014)

ANEXOS

ANEXO I

HOJA DE SEGURIDAD DE LA ACETONA

FORMULA: C₃H₆O, CH₃COCH₃.

PESO MOLECULAR: 58.08 g/ mol.

COMPOSICION: C: 62.04 %; H: 10.41 % y O: 27.55 %.

GENERALIDADES:

El acetona es un líquido incoloro, de olor característico agradable, volátil, altamente inflamable y sus vapores son mas pesados que el aire.

Se obtiene como subproducto en la fermentación por medio de la cual se obtiene alcohol butílico; por oxidación de isopropanol; por ruptura de hidroperóxido de cumeno en la cual se obtiene, además, fenol; por destilación de acetato de calcio; por destilación destructiva de madera y a partir de oxidación por cracking de propano.

Es utilizada como disolvente de grasas, aceites, ceras, hules, plásticos, lacas y barnices. Se usa en la manufactura de algunos explosivos, rayón, películas fotográficas, elaboración de removedores de pinturas y barnices, purificación de parafinas, en la deshidratación y endurecimiento de tejidos, en la extracción de algunos productos vegetales y animales y como materia prima en una gran variedad de síntesis en química orgánica. Por otra parte, junto con hielo y dióxido de carbono sólido, se puede utilizar para enfriar a temperaturas muy bajas.

NUMEROS DE IDENTIFICACION:

RTECS: AL3150000

CAS: 67-64-1

NFPA: Salud:1 Reactividad: 0 Fuego: 3

UN :1090

HAZCHEM CODE:

2 YE NIOSH: AL 3150000

RCRA: U002

NOAA : 8

MARCAJE: LIQUIDO INFLAMABLE

SINONIMOS:

2-PROPANONA

BETO-CETOPROPANO

En inglés:

DIMETIL CETONA

DIMETILFORMALDEHIDO

ACETONE

METIL CETONA

DIMETILCETAL

CHEVRON ACETONE

BETA-CETOPROPANONA

AC. PIROACETICO

ETER PIROACETICO

PROPIEDADES FISICAS Y TERMODINAMICAS:

Punto de ebullición: 56,5 °C

Punto de fusión: -94 °C

Densidad: 0.788 g/ ml (a 25°C); 0.7972 g/ml (a 15 °C) Índice de refracción: 1.3591 (a 20 °C)

Punto de inflamación en copa cerrada (flash point): -18

Temperatura de autoignición: 538 °C

Presión de vapor a (20 °C): 185 mm de Hg

Densidad de vapor (aire = 1): 2

Limites de explosividad: 2.6-12.8 %

Conductividad eléctrica (S/cm): 5.5 X 10⁸ (a 298.15 K) Temperatura crítica: 235.05 °C

Presión crítica: 35257.5 mm de Hg. Volumen crítico: 0.209 l/mol. Momento dipolar: 2.88 debyes

Volumen molar (l/mol): 0.739 (a 298.15 K)

Densidad molar (mol/l): 16.677 (sólido a -99 °C), 13.506 (líquido a 298.15 K) Temperatura de punto triple: -94.7 °C.

Presión de punto triple: 19.46 mm de Hg.

Solubilidad: Miscible con agua, alcoholes, cloroformo, dimetilformamida, aceites y éteres.

PROPIEDADES QUIMICAS:

El acetona es peligroso por su inflamabilidad, aún diluido con agua.

Productos de descomposición: Monóxido y dióxido de carbono.

Se ha informado de reacciones de oxidación vigorosas con:

- Oxígeno en presencia de carbón activado, mezclas de ácido nítrico/sulfúrico, bromo, trifluoruro de bromo, cloruro de nitrosilo, perclorato de nitrosilo, perclorato de nitrilo, cloruro de cromilo, trióxido de cromo, difluoruro de dioxígeno, terbutóxido de potasio, peróxido de hidrógeno y ácido peroxomonosulfúrico. Con los siguientes compuestos las reacciones son violentas: Bromoformo o cloroformo en presencia de una base, dicloruro de azufre y peróxido de metil-etil- cetona. Reacciona con sustancias clorantes, produciendo cetonas halogenadas que son muy tóxicas.

NIVELES DE TOXICIDAD:

LD₅₀ (en ratas en forma oral): 5800 mg/Kg

LD₅₀ (en piel de conejos): 20 mg/Kg

RQ: 5000

Niveles de irritación a ojos en humanos: 500 ppm

Niveles de irritación a piel en conejos: 395 mg, leve. 500 mg / 24 h, leve.

Niveles de irritación a ojos en conejos: 3.950 mg, severo. 100 mg/24h

MANEJO:

Equipo de protección personal:

Utilice bata, lentes de seguridad y, si es necesario, guantes de hule natural o neopreno (no utilizar PVC), en una zona bien ventilada, de preferencia en una campana. Evite un contacto prolongado de la piel con este producto químico. No debe utilizarse ropa de rayón ni lentes de contacto cuando se maneje este producto.

Al trasvasar pequeñas cantidades con pipeta, siempre utilizar propipetas, NUNCA ASPIRAR CON LA BOCA.

RIESGOS:

Riesgos de fuego y explosión:

Este es un producto inflamable. Los vapores pueden prenderse y generar un incendio en el lugar donde se generaron, además, pueden explotar si se prenden en un área cerrada.

Los rangos de inflamabilidad del vapor en aire son de 2.6 a 12.8 % en volumen.

Riesgos a la salud:

Este compuesto se ha utilizado por muchos años como disolvente y se ha informado de muy pocos efectos tóxicos, por lo que ha sido considerado como un producto poco peligroso, en este sentido.

Se ha observado que la presencia de acetona, aumenta la toxicidad al hígado de hidrocarburos clorados usados como disolventes, entre ellos 1,1-dicloroetileno y 1,1,2-tricloroetano.

En general, los principales síntomas de una intoxicación crónica por acetona son: dolor de cabeza, irritación de ojos, nariz y tráquea, los cuales desaparecen al salir del área contaminada.

Inhalación: En forma de vapor, causa irritación de ojos nariz y tráquea. En concentraciones muy altas (aproximadamente 12 000 ppm), puede afectar al sistema nervioso central, presentándose dolor de cabeza y cansancio. En casos extremos puede perderse la conciencia.

Contacto con ojos: En forma de vapor, los irrita causando lagrimeo y fluido nasal; el líquido puede causar daño a la córnea.

Contacto con la piel: Un contacto prolongado y constante con la piel provoca resequedad, agrietamiento y dermatitis. El líquido puede penetrar a través de la piel, lo mismo que el vapor a concentraciones mayores de 5000 mg/m³.

Ingestión: Causa irritación gástrica, dolor y vómito.

Carcinogenicidad: No existen evidencias que este producto induzca carcinogenicidad tanto en humanos, como en animales de laboratorio.

Mutagenicidad: Existen ensayos con Salmonella typhimurium, en los que se encontró compatibilidad con este disolvente sin que se presentaran reversiones.

Peligros reproductivos: La exposición de mujeres embarazadas a este producto, a una concentración entre 30 y 300 mg/m³ produce efectos embriotrópicos, aumentando los niveles de lípidos, incluso, hasta niveles embriotóxicos.

ACCIONES DE EMERGENCIA:

Primeros auxilios:

Inhalación: Si la inhalación ha sido prolongada, transportar al intoxicado a una zona bien ventilada. Si no respira, dar respiración artificial. Mantenerlo caliente y en reposo. Si es necesario, administrar oxígeno.

Ojos: Lávelos con agua o disolución salina, asegurándose de que los ojos se encuentren abiertos durante el lavado.

Piel: Lavar el área contaminada con agua y jabón. En caso necesario, elimine la ropa contaminada.

Ingestión: Lavar la boca con agua. Si se ingirió, diluir tomando agua. No inducir el vómito.

EN TODOS LOS CASOS DE EXPOSICION, EL PACIENTE DEBE SER TRANSPORTADO AL HOSPITAL TAN PRONTO COMO SEA POSIBLE.

Control de fuego:

Debe considerarse que durante la combustión de este producto se generan productos de descomposición como monóxido y dióxido de carbono.

En casos de fuegos pequeños, usar agua en forma de neblina, los chorros de agua pueden ser inefectivos. Pueden utilizarse extinguidores de polvo químico seco, espuma (resistente al alcohol) o dióxido de carbono.

En caso de fuegos mayores, la mejor forma de controlar el fuego es con espuma. Enfriar los contenedores afectados con agua. Aplique el agua desde una distancia segura.

Fugas y derrames:

Utilice el equipo de seguridad mínimo como bata y lentes de seguridad. Dependiendo de la magnitud del derrame, se utilizará equipo de respiración autónoma, botas y guantes de hule natural o neopreno, no utilizar PVC.

Evite la presencia de chispas, fuegos y cualquier fuente de ignición cerca del derrame y evacuar el área, si es necesario.

Evite que el líquido derramado entre en contacto con suministros de agua y drenajes. Por lo cual, deben construirse diques para contener el derrame.

Use agua en forma de rocío para dispersar y diluir los vapores. Este líquido debe almacenarse para tratarlo de manera adecuada posteriormente.

El derrame puede absorberse con arena o cualquier otro absorbente y tratarse como desechos.

Desechos:

Siempre mantenerlos alejados de fuentes de ignición.

Para pequeñas cantidades, puede absorberse con papel y dejarlo evaporar en una campana extractora de gases. No tirar al drenaje, pues pueden alcanzarse niveles explosivos.

Para cantidades grandes, se puede utilizar arena, cemento en polvo o tierra para absorberla y mantenerla en un área segura antes de incinerarla.

ALMACENAMIENTO:

Mantenga los recipientes que la contienen en un lugar bien ventilado, protegido de golpes, fuentes de ignición y de la luz directa del sol y alejados de materiales oxidantes, ácidos minerales y cloroformo. Tome las precauciones necesarias para evitar descargas estáticas. Recordar que los vapores son mas pesados que el aire, por lo que pueden acumularse y viajar hacia fuentes de ignición y regresar, generando fuego en las zonas de almacenamiento.

ANEXO II

HOJA DE SEGURIDAD DEL ACETATO DE N-BUTILO

Estado físico	líquido
Color	incolore
Olor	frutoso
Umbral de olor	720 ppm
Densidad	882,5 kg/m ³
Peso molecular	116,16
Fórmula molecular	C ₆ H ₁₂ O ₂
Punto de ignición	27 °C
Temperatura de autoignición	415 °C
Temperatura de fusión/rango	< -90 °C (Punto de fluidez)
Temperatura de ebullición/rango	126°C

Identificación de Peligros

Principales peligros: Inflamable.

Efectos para la salud

Ojos: El líquido puede provocar irritación de la conjuntiva.

Piel: El contacto reiterado o prolongado puede provocar una pérdida de grasa de la piel, conduce a una irritación o dermatitis.

Ingestión: La exposición al vapor puede tener los siguientes efectos: irritación de la boca, garganta y aparato digestivo. Depresión del sistema nervioso central, dolor de cabeza, vértigo, náuseas. Una dosis grande puede tener los siguientes efectos: pérdida de la consciencia.

Inhalación: La exposición al vapor puede tener los siguientes efectos: irritación de la nariz, garganta y las vías respiratorias. La exposición al vapor en altas concentraciones puede tener los siguientes efectos: depresión del sistema nervioso central, dolor de cabeza, vértigos, somnolencia, náuseas.

Medidas de primeros auxilios

Ojos: Enjuague el ojo inmediatamente con abundante agua por lo menos durante 10 minutos, manteniendo el ojo abierto. Obtenga atención médica si el dolor o enrojecimiento persisten.

Piel: Lave la piel con agua. Retire la ropa contaminada a medida que procede con el lavado. Obtenga atención médica si salen ampollas o el enrojecimiento persiste. La ropa contaminada debe lavarse antes de volverla a usar.

Ingestión: Lave la boca con agua. No inducir el vómito. Haga que la persona afectada beba 240-300 ml de agua. Si el vómito es natural, enjuague la boca y dele más agua. Manténgase abrigado y relajado. Obtenga atención médica.

Inhalación: Retírese de la exposición. Manténgase abrigado y relajado. Si no se siente bien obtenga atención médica.

Medidas de lucha contra incendios

Peligros Especiales del Producto: Las emanaciones pueden desplazarse a distancias considerables hacia una fuente de ignición y retroceder.

Medios de Extinción: Use espuma resistente al alcohol. Use producto químico en polvo o dióxido de carbono. Enfriar recipientes y alrededores con agua rociada.

NO ECHAR NUNCA

AGUA A CHORRO.

Equipos Protector para Combatir
Incendios

Usar traje completo de protección y aparato portátil de respiración.

Medidas a tomar en caso de derrame accidental

Precauciones individuales

Use ropa protectora correspondiente. Use protección respiratoria. Elimine todas las fuentes de ignición.

Precauciones para la protección del medio ambiente

Debe evitarse la entrada del material a las alcantarillas o red de aguas. Avise a las autoridades si ha ocurrido una penetración en la red de aguas o alcantarillado, o si se ha contaminado el suelo o la vegetación.

Métodos de limpieza

Derrames: Contener y absorber utilizando tierra, arena u otro material inerte. Transferir a un recipiente apropiado para su recuperación o eliminación. Finalmente, lavar el área con abundante agua.

Manipulación y Almacenamiento

Manipulación: Usese en área bien ventilada. Evitesé la inhalación de emanaciones. Evitesé el contacto con los ojos, la piel, y la ropa. Mantega el recipiente fuertemente cerrado cuando no se use.

Almacenamiento: El área de almacenamiento debe ser: Fria. Bien ventilada. Lejos de fuentes de calor o ignición. El equipo de almacenamiento debe contar con la adecuada toma de tierra y recubrimiento para evitar descargas estáticas. Los tanques de almacenamiento deben ubicarse dentro de áreas protegidas.

Trasvase de producto: El producto tiene riesgo de acumulación electrostática, usar toma de tierra.

Materiales recomendados: Acero blando. Aluminio y sus aleaciones. Goma butílica. Para embalajes y sellados use: PTFE.

Materiales no adecuados: Ciertos plásticos. Goma, caucho natural.

ANEXO III

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS EMPAQUES UTILIZADOS POR LA INDUSTRIA FARMACÉUTICA

Determinación de humedad

Para la determinación de humedad se pesó aproximadamente 1 g de materia prima en un crisol de porcelana. La muestra fue colocada en una estufa a 110 °C durante 12 h. Se registró el peso inicial y final de crisol. El porcentaje de humedad se calculó con la siguiente fórmula:

$$\%Humedad = \frac{M_o - M_f}{M_o} \times 100 \quad [AIII.1]$$

Donde:

M_o: peso inicial del crisol (g)

M_f: peso final del crisol (g)

Determinación de contenido de material volátil

Para la determinación de material volátil se pesó aproximadamente 1 g de materia prima en un crisol con tapa previamente tarado. La muestra se colocó en una mufla eléctrica Lindenberg/Blue BF51728C-1 a 750 °C durante 7 minutos. Se sacó el crisol y se lo enfrió a temperatura ambiente en un desecador. Se registró la masa del crisol (M_c), masa de la muestra (M_m), y la masa del crisol más la muestra después de los 7 minutos de tratamiento térmico (M_{mfv}). El porcentaje de material volátil se calcula con la siguiente fórmula:

$$\% Volatiles = \frac{M_c - M_{mfv}}{M_m} \times 100 \quad [AIII.2]$$

Donde:

M_c : Masa del crisol (g)

M_m : Masa inicial de la muestra (g)

M_{mfv} : Masa final del crisol más la muestra (g)

Determinación del contenido de carbón fijo y cenizas

Para la determinación del contenido de carbón fijo y cenizas se utilizó el mismo crisol con el que se realizó las pruebas de porcentaje de volátiles. La muestra se la llevó nuevamente a la mufla a 950 °C durante 2 h. Se sacó el crisol y se lo enfrió a temperatura ambiente en un desecador. Se registró la masa del crisol más la muestra después de las 2 h de tratamiento térmico. El porcentaje de carbón fijo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\%carbón\ fijo = \frac{M_{mfv} - M_{mfc}}{M_m} \times 100 \quad [AIII.3]$$

Donde:

M_{mfv} : Masa del crisol más la muestra sin material volátil (g)

M_{mfc} : Masa final del crisol más la muestra (g)

M_m : Masa inicial de la muestra (g)

Para determinar el porcentaje de cenizas que tiene la materia prima se calculó restando de 100 el porcentaje de volátiles y ceniza obtenidos anteriormente.

$$\%cenizas = 100 - \%volátiles - \%carbón\ fijo \quad [AIII.4]$$

Ficha Técnica No. AIII.1

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Determinación de humedad

Objetivo: Determinar la humedad promedio de los empaques tipo *blister*

Tabla AIII.1. Datos experimentales obtenidos en la determinación de humedad de los empaques tipo *blister*

	Masa inicial	Masa final	% Humedad
Muestra 1	1,0138	0,9612	5,18
Muestra 2	1,0186	0,9677	4,99
Muestra 3	1,0024	0,9501	5,21
		Promedio	5,13

Ejemplo de cálculo:

Para la Muestra 2

$M_o = 1,0186$ g

$M_f = 0,9677$ g

$$\%Humedad = \frac{M_o - M_f}{M_o} \times 100$$

$$\%Humedad = \frac{1,0186 - 0,9677}{1,0186} \times 100 = 4,9971 \%$$

Ficha Técnica No. AIII.2

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Determinación de contenido de material volátil, carbón fijo y cenizas.

Objetivo: Determinar el contenido de material volátil, carbón fijo y cenizas de 3 muestras de material *blister*.

Tabla AIII.2. Resultados de la determinación de material volátil, carbón fijo y cenizas de 3 muestras de empaque *blister*

Muestra	1	2	3
Peso Crisol	23,4215	23,8412	21,9745
Peso Muestra	1,0096	1,0024	1,0008
Peso 7 min	22,6497	23,0832	20,7897
Peso 2 horas	22,5878	23,0217	20,7276
% Volátiles	76,45	75,62	75,60
% Carbón fijo	6,13	6,14	6,21
% Cenizas	17,42	18,24	18,19

Tabla AIII.3. Valores promedio obtenidos de porcentaje de material volátil, carbón fijo y cenizas de 3 muestras de empaque *blister*

	% Volátiles	% Carbón fijo	% Cenizas
Promedio	75,89	6,16	17,95

Ejemplo de cálculo:

Para la Muestra 1

$$M_c = 23,4215 \text{ g}$$

$$M_m = 1,0096 \text{ g}$$

$$M_{mfv} = 22,6497 \text{ g}$$

$$\% \text{ Volatiles} = \frac{M_c - M_{mfv}}{M_m} \times 100 = \frac{23,4215 - 22,6497}{1,0096} = 76,45 \%$$

$M_{7m} = 24,0726 \text{ g}$

$M_{2h} = 23,8976 \text{ g}$

$M_m = 1,0004 \text{ g}$

$$\% \text{ carbón fijo} = \frac{M_{mfv} - M_{mfc}}{M_m} \times 100 = \frac{22,6497 - 22,5878}{1,0096} = 6,13 \%$$

$\% \text{ volátiles} = 80,43\%$

$\% \text{ carbón fijo} = 17,49\%$

$\% \text{ cenizas} = 100 - \% \text{ material volátil} - \% \text{ carbón fijo} = 100 \% - 76,45 \% - 6,13 \% = 17,42 \%$

Determinación de densidad real y aparente

Para la determinación de la densidad real se utilizó un picnómetro. En primer lugar se pesó el picnómetro vacío, después se agregó aproximadamente 1 g de muestra de *blister* y se obtuvo el peso, se llenó el picnómetro con agua destilada y se procedió a pesarlo. Finalmente se pesa el picnómetro únicamente con agua destilada. El cálculo de la densidad se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$\delta_r = \frac{1}{1 + \frac{(pic+H_2O)-(pic+m+H_2O)}{(pic+m)-(pic\ vacio)}} = g/cm^3 \quad [AIII.5]$$

Donde:

δ_r : Densidad real (g/cm³)

$pic + H_2O$: Masa picnómetro mas agua destilada (g).

$pic + m + H_2O$: Masa picnómetro mas muestra (g).

$pic + m$: Masa picnómetro mas muestra en (g).

$Pic\ vacio$: Masa picnómetro vacío en (g).

Para la determinación de la densidad aparente de los *blister* se siguió el siguiente procedimiento. Se pesó una probeta vacía, se colocó el material *blister* hasta un determinado volumen y se pesó nuevamente la probeta. El cálculo se realizó mediante el uso de la siguiente fórmula.

$$\delta_a = \frac{M_{P+M} - M_P}{V_P} \quad [AIII.6]$$

Donde:

δ_a : Densidad aparente (g/cm³).

M_{P+M} : Masa probeta mas muestra en (g).

M_P : Masa probeta vacía en (g).

V_P : Volumen en la probeta en (cm³).

Ficha Técnica No. AIII.3

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Determinación de densidad aparente y real del empaque tipo *blister*

Objetivo: Determinar la densidad real y aparente de una muestra de empaque *blister*

Tabla AIII.4. Resultados de la determinación de la densidad aparente de una muestra de empaque tipo *blister*

Parámetro	Valor	Unidades
M_{P+M}	523,30	G
M_P	442,40	G
V_P	1200	mL
Densidad aparente	0,0674	g/mL

Ejemplo de cálculo:

$$\rho_{aparente} = \frac{M_{P+M} - M_P}{V_P} = \frac{523,30 - 442,40}{1200} = 0,0674 \text{ g/cm}^3$$

Tabla AIII.5. Resultados de la determinación de la densidad real de una muestra de empaque tipo *blister*

Parámetro	Valor	Unidades
<i>Pic vacío:</i>	15,7416	G
<i>pic + m:</i>	16,7964	G
<i>pic + m + H2O:</i>	42,0210	G
<i>pic + H2O:</i>	41,7103	G
Densidad real	1,4176	g/cm³

Ejemplo de cálculo:

$$\delta_r = \frac{1}{1 + \frac{(pic+H2O)-(pic+m+H2O)}{(pic+m)-(pic\ vacío)}} = \frac{1}{1 + \frac{(41,7103)-(42,0210)}{(16,7964)-(15,7416)}} = 1,4176 \text{ g/cm}^3$$

ANEXO IV

**ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN PARA LA DEFINICIÓN DE LAS
MEJORES CONDICIONES DE LIXIVIACIÓN UTILIZANDO
SOLVENTES ORGÁNICOS (ACETONA Y ACETATO DE N BUTILO)**

Ficha Técnica No. AIV.1

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.1. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 1

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (98 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	30 min
Masa Inicial	4,0019 g
Resultados	
Masa Final	3,1223 g

Ejemplo de Cálculo:

$$\% \text{ Pérdida de masa}_{\text{Ensayo 1}} = \left(1 - \frac{m_{f\text{blister}}}{m_{i\text{blister}}}\right) \times 100 \%$$

$$\% \text{ Pérdida de masa}_{\text{Ensayo 1}} = \left(1 - \frac{3,1223}{4,0019}\right) \times 100 \%$$

$$\% \text{ Pérdida de masa}_{\text{Ensayo 1}} = 21,98 \%$$

Ficha Técnica No. AIV.2

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.2. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 2

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (98 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	60 min
Masa Inicial	4,0334 g
Resultados	
Masa Final	3,4104 g

Ficha Técnica No. AIV.3

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.3. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 3

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (98 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	90 min
Masa Inicial	4,0144 g
Resultados	
Masa Final	1,6941 g

Ficha Técnica No. AIV.4

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.4. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 4

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (98 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	120 min
Masa Inicial	4,0114 g
Resultados	
Masa Final	1,3124 g

Ficha Técnica No. AIV.5

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.5. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 5

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (98 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	150 min
Masa Inicial	4,0035 g
Resultados	
Masa Final	0,8351 g

Ficha Técnica No. AIV.6

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.6. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 6

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (98 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	180 min
Masa Inicial	4,0058 g
Resultados	
Masa Final	0,7847 g

Ficha Técnica No. AIV.7

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.7. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 7

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (50 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	30 min
Masa Inicial	4,1671 g
Resultados	
Masa Final	3,4514 g

Ficha Técnica No. AIV.8

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.8. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 8

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (50 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	60 min
Masa Inicial	3,9741 g
Resultados	
Masa Final	3,2214 g

Ficha Técnica No. AIV.9

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.1. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 9

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (50 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	90 min
Masa Inicial	4,0364 g
Resultados	
Masa Final	2,9812 g

Ficha Técnica No. AIV.10

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.10. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 10

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (50 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	120 min
Masa Inicial	4,0781 g
Resultados	
Masa Final	2,6846 g

Ficha Técnica No. AIV.11

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.11. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 11

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (50 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	150 min
Masa Inicial	4,0973 g
Resultados	
Masa Final	2,5431 g

Ficha Técnica No. AIV.12

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.12. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 12

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (50 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	180 min
Masa Inicial	3,9941 g
Resultados	
Masa Final	2,4227 g

Ficha Técnica No. AIV.13

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.13. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 13

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (25 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	30 min
Masa Inicial	4,0793 g
Resultados	
Masa Final	3,8745 g

Ficha Técnica No. AIV.14

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.14. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 14

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (25 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	60 min
Masa Inicial	4,1214 g
Resultados	
Masa Final	3,7198 g

Ficha Técnica No. AIV.15

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.15. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 15

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (25 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	90 min
Masa Inicial	3,9742 g
Resultados	
Masa Final	3,4001 g

Ficha Técnica No. AIV.16

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.16. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 16

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (25 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	120 min
Masa Inicial	3,9845 g
Resultados	
Masa Final	3,3397 g

Ficha Técnica No. AIV.17

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.17. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 17

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (25 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	150 min
Masa Inicial	3,9974 g
Resultados	
Masa Final	3,3012 g

Ficha Técnica No. AIV.18

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.18. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 18

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (25 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	180 min
Masa Inicial	4,0479 g
Resultados	
Masa Final	3,3711 g

Ficha Técnica No. AIV.19

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.19. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 19

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (98 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	30 min
Masa Inicial	3,9842 g
Resultados	
Masa Final	2,3458 g

Ficha Técnica No. AIV.20

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.20. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 20

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (98 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	60 min
Masa Inicial	4,0579 g
Resultados	
Masa Final	2,1145 g

Ficha Técnica No. AIV.21

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.21. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 21

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (98 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	90 min
Masa Inicial	4,1348 g
Resultados	
Masa Final	1,7543 g

Ficha Técnica No. AIV.22

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.22. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 22

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (98 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	120 min
Masa Inicial	4,1348 g
Resultados	
Masa Final	1,2416 g

Ficha Técnica No. AIV.23

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.23. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 23

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (98 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	150 min
Masa Inicial	4,0412 g
Resultados	
Masa Final	0,7520 g

Ficha Técnica No. AIV.24**Tipo de Muestra:** Empaque *blister***Tipo de Ensayo:** Lixiviación**Objetivo:** Separación de la lámina metálica del material polimérico**Tabla AIV.24.** Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 24

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (98 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	180 min
Masa Inicial	3,9912 g
Resultados	
Masa Final	0,7912 g

Ficha Técnica No. AIV.25**Tipo de Muestra:** Empaque *blister***Tipo de Ensayo:** Lixiviación**Objetivo:** Separación de la lámina metálica del material polimérico**Tabla AIV.25.** Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 25

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (50 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	30 min
Masa Inicial	4,0567 g
Resultados	
Masa Final	3,7515 g

Ficha Técnica No. AIV.26

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.26. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 26

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (50 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	60 min
Masa Inicial	4,0132 g
Resultados	
Masa Final	3,4378 g

Ficha Técnica No. AIV.27

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.27. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 27

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (50 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	90 min
Masa Inicial	4,0328 g
Resultados	
Masa Final	3,0241 g

Ficha Técnica No. AIV.28**Tipo de Muestra:** Empaque *blister***Tipo de Ensayo:** Lixiviación**Objetivo:** Separación de la lámina metálica del material polimérico**Tabla AIV.28.** Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 28

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (50 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	120 min
Masa Inicial	4,0796 g
Resultados	
Masa Final	2,9247 g

Ficha Técnica No. AIII.29**Tipo de Muestra:** Empaque *blister***Tipo de Ensayo:** Lixiviación**Objetivo:** Separación de la lámina metálica del material polimérico**Tabla AIV.29.** Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 29

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (50 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	150 min
Masa Inicial	4,0513 g
Resultados	
Masa Final	2,7413 g

Ficha Técnica No. AIV.30

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.30. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 30

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (50 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	180 min
Masa Inicial	4,0042 g
Resultados	
Masa Final	2,6471 g

Ficha Técnica No. AIV.31

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.31. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 31

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (25 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	30 min
Masa Inicial	4,0742 g
Resultados	
Masa Final	3,9748 g

Ficha Técnica No. AIV.32

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.32. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 32

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (25 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	60 min
Masa Inicial	4,0169 g
Resultados	
Masa Final	3,8413 g

Ficha Técnica No. AIV.33

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.33. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 33

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (25 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	90 min
Masa Inicial	4,0215 g
Resultados	
Masa Final	3,5412 g

Ficha Técnica No. AIV.34

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.34. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 34

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (25 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	120 min
Masa Inicial	4,0945 g
Resultados	
Masa Final	3,5131 g

Ficha Técnica No. AIV.35

Tipo de Muestra: Empaque *blister*

Tipo de Ensayo: Lixiviación

Objetivo: Separación de la lámina metálica del material polimérico

Tabla AIV.35. Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 35

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetato de n-butilo (25 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	150 min
Masa Inicial	4,0642 g
Resultados	
Masa Final	3,4863 g

Ficha Técnica No. AIV.36**Tipo de Muestra:** Empaque *blister***Tipo de Ensayo:** Lixiviación**Objetivo:** Separación de la lámina metálica del material polimérico**Tabla AIV.36.** Parámetros y resultados del ensayo de lixiviación No. 36

Parámetros	
Tipo de Muestra	Empaque tipo <i>blister</i>
Solvente	Acetona (25 %)
Temperatura	Ebullición
Tiempo	180 min
Masa Inicial	4,0123 g
Resultados	
Masa Final	3,4210 g

ANEXO V

**ENSAYOS DE FUSIÓN PARA LA DEFINICIÓN DE LAS MEJORES
CONDICIONES DE OPERACIÓN UTILIZANDO SALES DE CLORO
Y FLÚOR**

Ficha Técnica No. AV.1

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la mejor carga fundente

Tabla AV.1. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 1

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	100 % NaCl 0 % KCl
Masa Inicial	2,0244 g
Resultados	
Masa Final	0 g

Ficha Técnica No. AV.2

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la mejor carga fundente

Tabla AV.2. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 2

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	90 % NaCl 10 % KCl
Masa Inicial	2.0230 g
Resultados	
Masa Final	0,5201 g

Ficha Técnica No. AV.3

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la mejor carga fundente

Tabla AV.3. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 3

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	80 % NaCl 20 % KCl
Masa Inicial	2,0333 g
Resultados	
Masa Final	0,7124 g

Ficha Técnica No. AV.4

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la mejor carga fundente

Tabla AV.4. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 4

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	70 % NaCl 30 % KCl
Masa Inicial	2,0133 g
Resultados	
Masa Final	0,8110 g

Ficha Técnica No. AV.5

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la mejor carga fundente

Tabla AV.5. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 5

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0598 g
Resultados	
Masa Final	1,3376 g

Ficha Técnica No. AV.6

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la mejor carga fundente

Tabla AV.6. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 6

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	50 % NaCl 50 % KCl
Masa Inicial	2,0234 g
Resultados	
Masa Final	1,2685 g

Ficha Técnica No. AV.7

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la mejor carga fundente

Tabla AV.7. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 7

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	40 % NaCl 60 % KCl
Masa Inicial	2,0082 g
Resultados	
Masa Final	1,0847 g

Ficha Técnica No. AV.8

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la mejor carga fundente

Tabla AV.8. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 8

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	30 % NaCl 70 % KCl
Masa Inicial	2,0119 g
Resultados	
Masa Final	0,8085 g

Ficha Técnica No. AV.9

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la mejor carga fundente

Tabla AV.9. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 9

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	20 % NaCl 80 % KCl
Masa Inicial	2,0284 g
Resultados	
Masa Final	0,6257

Ficha Técnica No. AV.10

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la mejor carga fundente

Tabla AV.10. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 10

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	10 % NaCl 90 % KCl
Masa Inicial	2,0009 g
Resultados	
Masa Final	0.1076 g

Ficha Técnica No. AV.11

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la mejor carga fundente

Tabla AV.11. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 11

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	0 % NaCl 100 % KCl
Masa Inicial	2,0134 g
Resultados	
Masa Final	0 g

Ficha Técnica No. AV.12

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación del porcentaje de carga fundente

Tabla AV.12. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 12

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	0 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0004 g
Resultados	
Masa Final	0 g

Ficha Técnica No. AV.13

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación del porcentaje de carga fundente

Tabla AV.13. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 13

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	100 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0088 g
Resultados	
Masa Final	1,1214 g

Ficha Técnica No. AV.14

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación del porcentaje de carga fundente

Tabla AV.14. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 14

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	300 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0382 g
Resultados	
Masa Final	1,0108 g

Ficha Técnica No. AV.15

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación del porcentaje de carga fundente

Tabla AV.15. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 15

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	400 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0518 g
Resultados	
Masa Final	0,9412 g

Ficha Técnica No. AV.16

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la temperatura de fusión

Tabla AV.16. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 16

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	650 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0179 g
Resultados	
Masa Final	0 g

Ficha Técnica No. AV.17

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la temperatura de fusión

Tabla AV.17. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 17

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	700 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0064 g
Resultados	
Masa Final	0,8412 g

Ficha Técnica No. AV.18

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la temperatura de fusión

Tabla AV.18. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 18

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	800 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	1,9961 g
Resultados	
Masa Final	0,7916 g

Ficha Técnica No. AV.19

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la temperatura de fusión

Tabla AV.19. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 19

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	850 °C
Tiempo	2 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0843 g
Resultados	
Masa Final	0,7431 g

Ficha Técnica No. AV.20

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la temperatura de fusión

Tabla AV.20. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 20

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	0,25 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0468 g
Resultados	
Masa Final	0 g

Ficha Técnica No. AV.21

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación del tiempo de fusión

Tabla AV.21. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 21

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	0,5 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,020 g
Resultados	
Masa Final	0 g

Ficha Técnica No. AV.22

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la temperatura de fusión

Tabla AV.22. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 22

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	0,75 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0047 g
Resultados	
Masa Final	0 g

Ficha Técnica No. AV.23

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación del tiempo de fusión

Tabla AV.23. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 23

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	1,0 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0003 g
Resultados	
Masa Final	0,2801 g

Ficha Técnica No. AV.24

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación de la temperatura de fusión

Tabla AV.24. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 24

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	1,25 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0285 g
Resultados	
Masa Final	0,6134 g

Ficha Técnica No. AV.25

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, determinación del tiempo de fusión

Tabla AV.25. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 25

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	1,5 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0083 g
Resultados	
Masa Final	1,1843 g

Ficha Técnica No. AV.26**Tipo de Muestra:** Láminas de Al recuperadas por lixiviación**Tipo de Ensayo:** Fusión**Objetivo:** Fundición del Aluminio, determinación de la temperatura de fusión**Tabla AV.26.** Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 26

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	1,75 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	60 % NaCl 40 % KCl
Masa Inicial	2,0698 g
Resultados	
Masa Final	1,3456 g

Ficha Técnica No. AV.27**Tipo de Muestra:** Láminas de Al recuperadas por lixiviación**Tipo de Ensayo:** Fusión**Objetivo:** Fundición del Aluminio, influencia de la adición de KF**Tabla AV.27.** Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. 27

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	1,75 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	47,5 % NaCl 47,5 % KCl 5 % KF
Masa Inicial	2,0874 g
Resultados	
Masa Final	1,3412 g

Ficha Técnica No. AV.28

Tipo de Muestra: Láminas de Al recuperadas por lixiviación

Tipo de Ensayo: Fusión

Objetivo: Fundición del Aluminio, influencia de la adición de KF

Tabla AV.28. Parámetros y resultados del ensayo de fusión No. AV.28

Parámetros	
Tipo de Muestra	Lámina de Aluminio
Temperatura	750 °C
Tiempo	1,75 h
Porcentaje de Carga	200 %
Composición molar de la carga	45 % NaCl 45 % KCl 10 % KF
Masa Inicial	2,0450 g
Resultados	
Masa Final	1,3097 g

ANEXO VI

CÁLCULOS DE LAS CORRIENTES PARA LOS DIAGRAMAS BFD Y PFD

En esta sección a continuación se presenta los cálculos de las corrientes para los los diagramas BFD y PFD de la planta de recuperacion de aluminio a partir de empaques farmacéuticos.

El diseño se realiza para procesar 5 t/mes; por lo tanto, el valor diario de empaques farmacéuticos tipo *blister* resulta:

$$\text{Procesamiento diario} = 5 \frac{t}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{20 \text{ días}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 t} = 250 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Los empaques farmacéuticos tipo *blister* poseen aproximadamente el 82 % de material polimérico, por lo tanto la cantidad de PVC lixiviado será:

$$\text{PVC lixiviado} = 250 \frac{\text{kg de blister}}{\text{día}} \times \frac{820 \text{ kg de PVC}}{1000 \text{ kg de blister}} = 205 \frac{\text{kg de PVC}}{\text{día}}$$

De acuerdo a las condiciones de fundición planteadas se estableció una composición molar de sales de 60 % de NaCl y 40 % de KCl con un 200 % de carga fundente. Por tanto la cantidad de sales que se requieren para el proceso de fusión resultan:

$$\begin{aligned} \text{Láminas de aluminio} &= 250 \frac{\text{kg de blister}}{\text{día}} - 205 \frac{\text{kg de PVC}}{\text{día}} \\ &= 45 \frac{\text{kg de láminas de Al}}{\text{día}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de carga fundente} &= 45 \frac{\text{kg de láminas de Al}}{\text{día}} \times \frac{2 \text{ kg de carga fundente}}{1 \text{ kg de laminas de Al}} \\ &= 90 \frac{\text{kg de carga fundente}}{\text{día}} \end{aligned}$$

Es necesario calcular el peso molecular promedio de la carga fundente utilizada, para lo cual se utilizan las fracciones másicas de cada uno de los componentes.

$$\begin{aligned}\overline{PM}_{60\% NaCl y 40\% KCl} &= X_{NaCl} \times PM_{NaCl} + X_{KCl} \times PM_{KCl} \\ \overline{PM}_{60\% NaCl y 40\% KCl} &= 0.54 \times 58,43 \frac{kg}{mol} NaCl + 0.46 \times 74,55 \frac{kg}{mol} NaCl \\ &= 65,84 \frac{kg}{mol}\end{aligned}$$

La cantidad de cada una de las sales se obtiene:

Cantidad de NaCl

$$\begin{aligned}&= 90 \frac{kg \text{ carga fundente}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ mol de carga fundente}}{65,84 \text{ kg de carga fundente}} \\ &\times \frac{0,6 \text{ mol de NaCl}}{1 \text{ mol de carga fundente}} \times \frac{58,43 \text{ kg de NaCl}}{1 \text{ mol NaCl}} = 48,63 \frac{kg}{\text{día}} \text{ de NaCl}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Cantidad de NaCl} &= 90 \frac{kg}{\text{día}} \text{ Carga fundente} - 48,93 \frac{kg}{\text{día}} \text{ de NaCl} \\ &= 41,37 \frac{kg}{\text{día}} \text{ de KCl}\end{aligned}$$

Finalmente, de acuerdo a los ensayos de fusión realizados se obtuvo que la mayor recuperación de aluminio es del 65 %, por lo tanto:

Aluminio metálico recuperado

$$\begin{aligned}&= 45 \frac{kg}{\text{día}} \text{ de láminas de aluminio} \times \frac{65 \text{ kg de aluminio metálico}}{100 \text{ kg de láminas de aluminio}} \\ &= 29,25 \frac{kg}{\text{día}} \text{ de aluminio metálico}\end{aligned}$$

Cálculo del vapor requerido para el proceso de lixiviación y recuperación del solvente

$$\begin{aligned}\dot{Q}_v &= \text{Calor transmitido al solvente} \\ \dot{Q}_v &= \dot{m}_s \times C_{p_s} \times (T_{eb} - T_{ref}) + \dot{m}_s \times L_p \\ \dot{Q}_v &= 1000 \frac{kg}{\text{día}} \times 2,19 \times 10^5 \frac{J}{\text{kmol} \cdot ^\circ C} \times \frac{1}{116,16} \frac{\text{kmol}}{kg} \times \frac{1 \text{ cal}}{4,18 J} \times (126 - 25)^\circ C \\ &+ 1000 \frac{kg}{\text{día}} \times 4,8943 \times 10^7 \frac{J}{\text{kmol}} \times \frac{1}{116,16} \frac{\text{kmol}}{kg} \\ \dot{Q}_v &= 466 896 \frac{kcal}{\text{día}} \\ \dot{Q}_v &= m_v \times H_g\end{aligned}$$

$$m_v = \frac{466\,896 \frac{\text{kcal}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}}}{2\,256,12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ kcal}}{4,18 \text{ KJ}}} = 36,04 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

El proceso de destilación demanda la misma cantidad de vapor que el proceso de lixiviación por tanto la masa total del vapor es el doble.

$$m_v = 72,08 \frac{\text{kg}}{4}$$

Se sabe que 1 BHP es 15,35 kg de vapor a 100 °C; por tanto, la capacidad del caldero definida para este diseño es de: 4,7 BHP .

Cálculo del GLP necesario para el funcionamiento del caldero:

$$Q_{comb} = Pc \times m_{comb}$$

$$m_{comb} = \frac{466\,896 \frac{\text{kcal}}{\text{día}}}{10\,830 \frac{\text{kcal}}{\text{kg GLP}}} = 43,11 \frac{\text{kg GLP}}{\text{día}}$$

ANEXO VII
HOJAS DE ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS
SELECCIONADOS

Tabla VII.1. Hoja de especificación del tanque seleccionado para el proceso de lixiviación de empaque farmacéuticos tipo *blister*

NOMBRE DEL EQUIPO: Tanque con camisa de Vapor de calefacción					
FABRICANTE: Flowtam			NÚMERO EN PLANTA: L-101		
DIMENSIONES			PARÁMETROS DE DISEÑO		
Volumen:	2,4 m ³		Estándar:	ISO & CE	
Altura:	2,2 m		Origen:	China	
Diámetro:	1,2 m		Material:	Acero Inoxidable	
CARACTERÍSTICAS DE CATÁLOGO					
Capacidad (L)		1000	2000	2500	3000
Área del traspaso térmico	Altura	2200	2220	2400	2500
	2	2.4	2.7	3.1	4.5
					
Figura AVII.1. Tanque de lixiviación					

Tabla VII.2. Hoja de especificación del tanque seleccionado para el proceso recuperación de solvente

NOMBRE DEL EQUIPO: Tanque con camisa de calefacción de vapor de acero inoxidable	
FABRICANTE: Nikken	NÚMERO EN PLANTA: D-102
DIMENSIONES	PARÁMETROS DE DISEÑO
Volumen: 1 m ³ Altura: 3,1 m Diámetro: 2,1 m	Modelo: Kde-j19-1000 Material: Acero inoxidable
CARACTERÍSTICAS DE CATÁLOGO	
Material	Sus304/sus316
Volumen	1000L
Espesor	2.5-3.0mm
Tratamiento de la superficie interna	Pulido 400 #
Tratamiento superficial exterior	Ácido-lavado
Vida útil	15-20 años
	
Figura AVII.2. Destilador	

Tabla VII.3. Hoja de especificación de la prensa hidráulica seleccionada

NOMBRE DEL EQUIPO: Prensa hidráulica	
FABRICANTE: MACFAC	NÚMERO EN PLANTA: PR- 103
<p>DIMENSIONES</p> <p>Capacidad: 60 kg</p> <p>Altura: 1,98 m</p> <p>Ancho: 1,04 m</p> <p>Profundidad: 0,72 m</p> <p>DIMENSIONES DE LAS BALAS:</p> <p>Altura: 0,80 m</p> <p>Ancho: 0,70 m</p> <p>Profundidad: 0,50 m</p>	<p>PARÁMETROS DE DISEÑO</p> <p>Peso: 230 kg</p> <p>Potencia: 220 V</p> <p>Motor: 1,5 kW – 13 Amp</p> <p>Fuerza de presión: hasta 3.5 toneladas</p> <p>Nivel de ruido: 72 decibeles</p> <p>Tiempo de compactación: 24 s</p>
<p>CARACTERÍSTICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diseño compacto • Ideal para zonas de espacio limitado • Disponibles para corriente de 110 V • Incluye carretillas elevadoras de balas 	
<p>CARACTERÍSTICAS DE CATÁLOGO</p> <div style="text-align: center;">  </div>	
<p>Figura AVII.3. Prensa hidráulica</p>	

Tabla VII.4. Hoja de especificación del horno eléctrico seleccionado para procesos de fundición de aluminio

NOMBRE DEL EQUIPO: Horno de fusión por inducción aluminio						
FABRICANTE: Qingdao Besttech Machinery Co., Ltd			NÚMERO EN PLANTA: H-104			
DIMENSIONES Largo: 1,0 m Ancho: 1,0 m Alto: 1,0 m			PARÁMETROS DE DISEÑO Tipo: Horno de inducción Voltaje: 380 V Peso: 150 kg Certificación: ISO9001:2008			
ESPECIFICACIONES Funcionamiento automático con gran precisión. Recomendado para fusión de acero, hierro, acero inoxidable, cobre, aluminio y otros. Buena uniformidad de calor, pequeña diferencia de temperatura en la superficie del núcleo						
CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS Salida de potencia constante, rápida fusión, buena eficiencia de ahorro de electricidad. Inicio estilo de barrido de frecuencia cero de tensión, se adapta a los requerimientos de frecuencia comience. Fácil de utilizar, conveniente para todos los procesos de fundición.						
CARACTERÍSTICAS DE CATÁLOGO						
Modelo	Capacidad nominal (t)	Potencia nominal (KW)	Frecuencia (KHZ)	Voltaje de entrada (V)	Voltaje de salida (V)	Temperatura (°C)
GWL-0.15T-100KW/1S	0.15	10	1	380	1500	780
GWL-0.3T-160KW/1S	0.3	16	1	380	1500	780
GWL-0.5T-250KW/1S	0.5	25	1	380	1500	780
GWL-0.75T-350KW/1S	0.75	35	1	380	1500	780
GWL-1T-500KW/0.4S	1	50	0.4	380	1500	780
GWL-1.5T-750KW/0.4S	1.5	75	0.4	380	1500	780
GWL-3T-1500KW/0.4S	3	150	0.4	720	1500	780

Tabla VII.4. Hoja de especificación del horno eléctrico seleccionado para procesos de fundición de aluminio (**continuación...**)

ESQUEMA DEL EQUIPO



Figura AVII.4. Horno de Fusión

Tabla VII.5. Hoja de especificación la caldera escogida para la generación de vapor

NOMBRE DEL EQUIPO: Caldera			
FABRICANTE: GAS Y GAS			
PARÁMETROS DE DISEÑO			
Tipo: Caldera a Gas			
BHP: 5			
DESCRIPCION DE LA CALDERA A GAS			
Calderas de 2 pasos de circulación de gases tipo paquete de 1 Hogar. El equipo que ponemos a su disposición es una Caldera pirotubular vertical cuya construcción está sujeta a sus necesidades, manteniendo nuestros diseños modernizados para la generación de vapor con la más alta eficiencia térmica y de vaporización rápida.			
CARACTERÍSTICAS DE CATÁLOGO			
CARACTERISTICAS	5-BHP	10-BHP	12-BHP
POTENCIA MAXIMA	200.000 BTU/H	400.000 BTU/H	401.700 BTU/H
TIPO DE COMBUSTIBLE	NAT - GLP	NAT - GLP	NAT - GLP
PRESION DE TRABAJO MAXIMO	80 PSI	120 PSI	120 PSI
PRODUCCION DE VAPOR/HORA	173 LB/H	345 LB/H	414 LB/H
CONEXIÓN AGUA	DIRECTAMENTE DEL ACUEDUCTO/O PCIONAL BOMBA	DIRECTAMENTE DEL ACUEDUCTO/O PCIONAL BOMBA	DIRECTAMENTE DEL ACUEDUCTO/O PCIONAL BOMBA
CONEXIÓN GAS	3/4" NPT	3/4" NPT	1.1/4" NPT
CONEXIÓN VAPOR	1/2" NPT - 80 PSI	1/2" NPT-80 PSI	1.1/4" NPT - 80 PSI
ESQUEMA DEL EQUIPO			
			
Figura AVII.5. Caldera			

ANEXO VIII

EJEMPLOS DE CÁLCULO DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO- ECONÓMICA DE UNA PLANTA CON CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE 5 t/MES DE EMPAQUES FARMACÉUTICOS

En esta sección se presenta los cálculos del estudio de prefactibilidad técnico-económica de la planta de recuperación de aluminio a partir de empaques farmacéuticos.

Todos los valores reportados corresponden a un año de operación de la planta.

Costos Fijos

Los costos variables están determinados por los salarios del personal y el mantenimiento de los equipos.

A continuación se realiza el cálculo del salario anual de un operario de la planta de recuperación de aluminio de empaques farmacéuticos tipo *blister*, para el cual se toma en cuenta el salario básico unificado de 340 \$/mes, un porcentaje de 11,15 % de aporte al IESS y el 8,33 % para los fondos de reserva. Por tanto:

$$\begin{aligned} \text{Salario Anual}_{\text{operario}} &= 12 \times (\text{salario Mensual} + \text{aporte al IESS}) + \text{Décimo tercero} \\ &\quad + \text{décimo cuarto} + \text{vacaciones} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Salario Anual}_{\text{operario}} &= 12 \times (340 + 340 \times 11,15 \% + 340 \times 8,33 \% + 340 + 340 + 340) \\ &= 5\,894,78 \text{ \$/año} \end{aligned}$$

El costo anual del mantenimiento de los equipos se define como el 2 % del valor de adquisición de los mismos. Por tanto:

$$\text{Mantenimiento} = 2 \% \times \text{costo maquinaria}$$

$$\text{Mantenimiento} = 2 \% \times 25\,500 (\$) = 510 \$/\text{año}$$

Costos Variables

Los costos variables están determinados por los costos de insumos y los costos de servicios industriales (energía eléctrica).

A continuación se realiza el cálculo del consumo anual de cada uno de los reactivos utilizados para la recuperación de aluminio de empaques farmacéuticos tipo *blister*.

- **Cloruro de sodio (NaCl)**

Con base en el balance de masa realizado se determinó un consumo diario de 48,63 kg de NaCl. Por tanto, el consumo anual resulta:

$$m_{NaCl} = 48,63 \frac{kg}{día} \times 20 \frac{día}{mes} \times 12 \frac{mes}{año} = 11\,671,2 \frac{kg}{año}$$

- **Cloruro de potasio (KCl)**

Con base en el balance de masa realizado se determinó un consumo diario de 41,37 kg de NaCl. Por tanto, el consumo anual resulta:

$$m_{NaCl} = 41,37 \frac{kg}{día} \times 20 \frac{día}{mes} \times 12 \frac{mes}{año} = 9\,928,8 \frac{kg}{año}$$

- **Acetato de n-butilo**

De acuerdo al diseño de la planta de recuperación de aluminio se dispone de un tanque de recuperación de solvente para su reutilización diaria; sin embargo, se asume que las pérdidas por evaporación de solvente es del 2 %. Por tanto, la adquisición anual del solvente resulta:

$$m_{NaCl} = 1000 \frac{kg}{día} \times 20 \frac{día}{mes} \times 12 \frac{mes}{año} \times 0,02 = 4\,400 \frac{kg}{año}$$

A continuación se realiza el cálculo de las horas de operación anual de cada uno de los equipos utilizados.

- **Tanque de lixiviación**

Diariamente se realiza un total de 2 lixivaciones durante 1,50 h; por lo tanto, el tiempo anual de operación del equipo resulta:

$$t_{\text{Tanque de Lixiviación}} = 3 \frac{h}{\text{día}} \times 20 \frac{\text{día}}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{mes}}{\text{año}} = 720 \frac{h}{\text{año}}$$

- **Prensa hidráulica**

Diariamente se realiza una compactación de las láminas de aluminio. De acuerdo al valor reportado en catálogo, el tiempo requerido es de 24 s. Por lo tanto el tiempo de operación anual de la prensa resulta:

$$t_{\text{Prensa}} = 24 \frac{s}{\text{día}} \times 20 \frac{\text{día}}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{mes}}{\text{año}} \times \frac{1 h}{3600 s} = 1,6 \frac{h}{\text{año}}$$

- **Equipo de destilación**

Diariamente se realiza un total de 2 destilaciones para la recuperación del solvente, durante 1 h cada una. Por lo tanto, el tiempo anual de operación del equipo resulta:

$$t_{\text{Tanque de Lixiviación}} = 2 \frac{h}{\text{día}} \times 20 \frac{\text{día}}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{mes}}{\text{año}} = 480 \frac{h}{\text{año}}$$

- **Equipo de fusión**

Diariamente se realiza una fundición de las láminas de aluminio compactadas previamente por la prensa hidráulica. El proceso se realiza durante 1,75 h cada una. por lo tanto, el tiempo anual de operación del equipo resulta:

$$t_{\text{Tanque de Lixiviación}} = 1,75 \frac{h}{\text{día}} \times 20 \frac{\text{día}}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{mes}}{\text{año}} = 420 \frac{h}{\text{año}}$$

Cálculo de los indicadores económicos

La determinación de la factibilidad económica se realizó mediante el cálculo y análisis de tres indicadores. En primer lugar se calculó el valor actual neto mediante la ecuación 2.7.

$$VAN = -A + \sum_{t=1}^n Ft \times (1 + i)^{-t}$$

Donde:

Ft = valor neto de flujo de caja

i= tasa de retorno del período

t= períodos de tiempo analizados

$$\begin{aligned} VAN &= -14\,182,82 + 4320,10 \\ &\quad \times [(1.1)^{-1} + (1.1)^{-2} + (1.1)^{-3} + \dots + (1.1)^{-10} + (1.1)^{-5}] \\ &= 12\,362,31 \$ \end{aligned}$$

La tasa interna de retorno se calcula igualando la ecuación 2.7 a cero. Por lo tanto:

$$VAN = -A + \sum_{t=1}^n Ft \times (1 + TIR)^{-t} = 0$$

$$\begin{aligned} 0 &= -14\,182,82 + 4320,10 \\ &\quad \times [(1 + TIR)^{-1} + (1 + TIR)^{-2} + (1 + TIR)^{-3} + \dots + (1 + TIR)^{-10} \\ &\quad + (1 + TIR)^{-5}] \end{aligned}$$

$$TIR = 27,85 \%$$

Finalmente la relación costo beneficio se calculó realizando el cociente del sumatorio del valor actual de año 1 al año diez para el valor actual del año 0. Por tanto el indicador mencionado resulta:

$$C/B = \frac{3\,927,36 + 3\,570,33 + 3\,245,75 + \dots + 1\,665,58}{14\,182,82} = 1,87$$

