



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA**

**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECICLADO DE TARJETAS DE  
CIRCUITOS IMPRESOS -PCB-“**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO INDUSTRIAL**

**PRESENTA:**

**JOSÉ MANUEL OLIVERA PONCE**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DRA. PATRICIA MAGALY GALLEGOS ACEVEDO**

**CO-DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. DOMINGO SALAZAR MENDOZA**

**HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA.**

**ABRIL 2013**

## DEDICATORIA

A todas aquellas personas que trabajaron conmigo arduamente, que siempre creyeron en mí para desarrollar este proyecto.

A mis padres los cuales desde muy pequeño me enseñaron a trabajar y estudiar para poder salir adelante y hacer de mí una buena persona.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de tesis se realizó gracias al financiamiento del proyecto #83091 de ciencia básica SEP-CONACYT “Estabilidad de la espuma en columnas y celdas de flotación: efecto de la concentración de espumante, de sólidos y de la velocidad superficial de aire”, así como el otorgamiento de una beca al C. José Manuel Olivera Ponce (Becario N° 17686).

Agradezco a la vida por darme una familia tan alegre y cariñosa que siempre me ha apoyado durante los estudios de mi carrera profesional, a mis padres LUIS OLIVERA RAMÍREZ y EVA PONCE MÉNDEZ, a mis hermanos GUADALUPE DEL CARMEN OLIVERA PONCE Y LUIS JOSUÉ OLIVERA PONCE.

A mi directora de tesis PATRICIA MAGALY GALLEGOS ACEVEDO y a mi asesor DOMINGO SALAZAR MENDOZA por haber creído en mí y haberme transmitido el suficiente conocimiento para poder desarrollar este proyecto.

Al Instituto de Minería por el apoyo que recibí durante la realización de mi proyecto.

A los profesores de ingeniería industrial IGNACIO HERNÁNDEZ CASTILLO y RODOLFO CARRO LÓPEZ que siempre me apoyaron durante mi carrera profesional.

A mis sinodales ORQUÍDEA SÁNCHEZ LÓPEZ, RODOLFO CARRO LÓPEZ y MOISÉS MANZANO HERRERA por su colaboración en este proyecto.

A mis compañeros con los que conviví cinco años durante mi carrera profesional, a todos mis amigos y familiares que intervinieron durante mi carrera profesional apoyándome siempre en los momentos más difíciles.

## ÍNDICE GENERAL

	PÁGINA
DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE GENERAL	4
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	9
RESUMEN	10
CAPÍTULO I	11
INTRODUCCIÓN	11
1.1 Introducción	12
1.2 Planteamiento del problema	13
1.3 Objetivo general	15
1.3.1 Objetivos particulares	15
1.4 Justificación	15
1.5 Delimitaciones	18
CAPÍTULO II	19
ANTECEDENTES	19
2.1 Generalidades	20
2.2 Técnicas de recuperación de metales	23
2.2.1 Pretratamiento	25
2.2.2 Separación	26
2.2.2.1 Proceso de separación física	26
2.2.2.2 Proceso fisico-químico	30
2.2.2.2.1 La flotación	30
2.2.3 Recuperación de metales	32
2.2.3.1 Procesos pirometalúrgicos	32
2.2.3.2 Procesos hidrometalúrgicos	33
CAPITULO III	36
EXPERIMENTACIÓN	36
3.1 Materiales y reactivos	37
3.2 Aparato experimental	39
3.3 Análisis de matriz de prioridades para la selección de método de separación	43

3.4 Pruebas preliminares	46
3.5 Desarrollo experimental	52
3.6 Metodología experimental	53
CAPITULO IV	57
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
4.1 Definición de recuperación	58
4.2 Recuperación de fibra vidrio ( $R_{FV}$ ) y metal	60
4.2.1 Análisis estadístico	61
4.2.2 Determinación de los parámetros adecuados para la recuperación de fibra de vidrio	64
4.2.3 Análisis grafico	66
4.2.3.1 Efecto del contenido de sólidos	66
4.2.3.2 Efecto del concentrado de espumante y agitación	67
4.2.4 Simulación de un circuito de flotación	70
CAPITULO V	75
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	76
ANEXOS	78
ANEXO 1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS METALES Y PLÁSTICOS PRESENTES EN LOS DESECHOS ELECTRÓNICOS	79
ANEXO 2 CONDICIONES DE TRABAJO PARA CADA EXPERIMENTO	81
ANEXO 3 HOJAS DE CÁLCULO PARA LA EXPERIMENTACIÓN: RÉPLICA 1	82
ANEXO 4 HOJAS DE CÁLCULO PARA LA EXPERIMENTACIÓN: RÉPLICA 2	84

ANEXO 5 ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)	86
ANEXO 6 PUNTOS PORCENTUALES DE LA DISTRIBUCIÓN F	89
BIBLIOGRAFÍA	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Proceso industrial de reciclaje de aparatos eléctricos y electrónicos (DAEE)	14
Figura 2. Proceso de reciclaje de PCB que se propone.	17
Figura 3. Representación esquemática de diagrama de flujo que presenta las opciones potenciales del proceso para la recuperación de metales de desechos electrónicos (Tuncuk et al., 2012)	25
Figura 4. Diagrama de flujo típico para la recuperación de metales no ferrosos provenientes de los DAEE antes de la fundición (Tuncuk et al., 2012)	29
Figura 5. Representación esquemática de una celda de flotación (Green y Perry, 2009).	31
Figura 6. Diagrama de flujo de la planta Hoboken, Umicore, Bélgica que integra la fundición y la refinería (Umicore, 2011)	33
Figura 7. Efecto de la presencia del H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> sobre la extracción del cobre	35
Figura 8. Fragmentos de PCB	37
Figura 9. Producto tratado por SM	37
Figura 10. Dodecilamina	38
Figura 11. Metil Isobutil Carbinol	38
Figura 12. Hidróxido de sodio	38
Figura 13. Máquina de flotación tipo Denver D-12	40
Figura 14. Termómetro digital	41
Figura 15. Potenciómetro	41
Figura 16. Balanza analítica	41
Figura 17. Balanza granataria	41
Figura 18. Probeta	42
Figura 19. Cronómetro	42
Figura 20. Resistencia eléctrica	42
Figura 21. Representación esquemática del efecto de la concentración de espumante sobre el tamaño de burbuja (Melo y Laskowski, 2005).	47
Figura 22. Recuperación de materiales variando los porcentajes de sólidos.	49
Figura 23. Alimentación de agua	53
Figura 24. Dosificación de espumante	54
Figura 25. Proceso de flotación	55
Figura 26. Material después de flotación	56
Figura 27. Balance de masa ( $F = C + T$ )	59
Figura 28. Condiciones recomendables para la recuperación de fibra de vidrio	65
Figura 29. Efecto que tiene la concentración de espumante (ppm) sobre la recuperación de fibra de vidrio a diferentes velocidades de agitación (RPM) y contenidos de sólidos	66

Figura 30. Efecto que tiene la agitación a diferentes concentraciones de espumante al 3%	67
Figura 31. Fibra de vidrio y metal que conforman la corriente del concentrado de la prueba 10	68
Figura 32. Fibra de vidrio y metal que conforman la corriente de colas de la prueba 10	69
Figura 33. Simulación de circuito de flotación	72
Figura 34. Proporciones de fibra de vidrio y metal presentes en la alimentación y en la Salida 1 y Salida 2.	73

## ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1. Composición estimada de metales preciosos contenidos en las PCB a partir de una tonelada de teléfonos celulares en desuso, la cantidad por tonelada de metal correspondiente obtenido a partir una tonelada de mineral y su precio en el mercado en dólares de acuerdo a la LME.	16
Tabla 2. Materiales que componen un DAEE (Tuncuk et al., 2012).	22
Tabla 3. Composición química y valor de los DAEE comparado con minerales típicos de los metales (Tuncuk et al., 2012).	23
Tabla 4. Métodos de separación física y su potencial para la recuperación de metales de los DAEE (Cui y Forssberg, 2003; Zhang y Forssberg, 1988).	27
Tabla 5. Análisis de matriz de prioridades para la selección de método de separación.	43
Tabla 6. Diseño de experimentos en el proceso de flotación.	52
Tabla 7. Porcentaje de recuperación de metal y fibra de vidrio.	60
Tabla 8. ANOVA para el porcentaje de recuperación de fibra de vidrio. Diseño de 3 factores con 2 réplicas: espumante, agitación y sólidos con 3, 3 y 2 niveles respectivamente para tener un total de 36 corridas.	61
Tabla 9. Efecto significativo (si $F_0 > F_{Tablas}$ ) de los factores y sus interacciones.	63
Tabla 10. Resultados finales del circuito de flotación	73

## RESUMEN

En este trabajo de tesis, se presentan los resultados obtenidos al emplear el proceso de flotación para separar los componentes metálicos y no metálicos provenientes de las tarjetas de circuitos impresos -PCB-. Éstas se fragmentaron en secciones de 0.5 x 0.5 cm, las cuales fueron tratadas mediante el proceso SM, el cual separa los componentes: metales, no metales y resina.

Se empleó un diseño de experimentos de tres factores: la concentración de espumante (ppm), la velocidad de agitación (RPM) y la concentración de sólidos (%), cada uno de ellos con 3, 3 y 2 niveles, respectivamente.

Los resultados muestran que es posible obtener dos productos: el concentrado que contiene el 93% de la fibra de vidrio (no metálico) y las colas con 89% de metal, cuando se opera con 15 ppm de espumante, 1400 RPM y 3% de sólidos. Además, se empleó el software Minitab 14.0 para analizar los resultados mediante análisis de varianza (ANOVA) con  $\alpha=0.05$ .

Adicionalmente, se presenta una simulación de un circuito de flotación con la finalidad de dar una propuesta para el diseño de una planta piloto, el cual consta de tres bancos de celdas interconectadas. De este circuito se pueden obtener productos que superan el 99% de recuperación.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente el crecimiento de los DAEE (Desechos de aparatos eléctricos y electrónicos) crece de manera alarmante a una velocidad del 3 al 5% en los basureros municipales. A pesar de que los DAEE contienen materiales contaminantes, muchos países no tienen programas de reciclaje, recuperación y reuso. Los países de la Unión Europea tienen algunas directrices orientadas a la disposición final de éstos desechos.

El procesamiento de los DAEE es muy similar al empleado en los minerales: reducción de tamaño de partícula, separación, concentración de los elementos de interés y refinación. Uno de los pasos determinantes para el éxito del proceso es la reducción de tamaño: en el caso de PCB (Tarjetas de circuito impreso) la disminución de tamaño de partícula está asociada a la pérdida de valores metálicos de interés como los metales preciosos; oro (Au), plata (Ag), paladio (Pd) y platino (Pt).

En este trabajo se presenta la optimización del proceso de flotación, en la separación de los materiales que constituyen las PCB; placa metálica y fibra de vidrio obtenidos mediante el proceso SM. Si bien este método ha sido desarrollado para separar minerales con tamaños de partícula inferiores a 150  $\mu\text{m}$ , aquí se empleó para separar partículas desde 35  $\mu\text{m}$  hasta fragmentos de 5 mm.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cantidades enormes y crecientes de residuos se desechan cada año y algunos tipos ellos contienen compuestos tóxicos y cancerígenos que pueden suponer un riesgo para el medio ambiente. Uno de estos residuos son los DAEE de artículos como televisores, computadoras, pantallas LCD y de plasma, teléfonos móviles, etc. En Europa crecen rápidamente: en 1998 se produjeron alrededor de 6 millones de toneladas de DAEE y para el 2005 se incrementó entre 8.6 y 9.1 millones de toneladas. La tasa de crecimiento es del 5.3 % anual por lo que se estima que para el 2020 se producirán un total de 12 millones de toneladas aproximadamente (Hester y Harrison, 2009).

Uno de los componentes principales de los DAEE son las PCB. Se estima que de estos desechos se generan 50,000 toneladas anuales solamente en Inglaterra y que el 85% termina en los basureros (Hester y Harrison, 2009).

En Europa se han intentado establecer normas y directrices sobre la disposición final de los DAEE y en los últimos años se ha desarrollado una industria alrededor de éstos.

El usuario medio de computadoras en el mundo actualmente reemplaza sus equipos cada 24-48 meses; estando nuestro país precisamente dentro de dicho promedio; pero además en México anualmente se reciben “donaciones” (de países desarrollados) de computadoras u otros equipos que prácticamente terminan a corto plazo en la basura. Es decir, es evidente la necesidad de nuestro país por abordar investigaciones referentes a la recuperación de metales preciosos contenidos en PCB, pues la cantidad de metales preciosos contenidos en éstas es incluso mayor que la contenida en las minas de Au y Ag por ejemplo, por tanto las fuentes secundarias de metales son cada vez más atractivas.

Inicialmente los procesos que se han empleado para la recuperación de metales contenidos en los DAEE (Figura 1) y otros materiales son los desarrollados en el procesamiento de minerales: trituración, molienda, separación

y recuperación de metales. Sin embargo, en este proceso se manejan partículas micrométricas generando polvos y teniendo como consecuencia la pérdida de los metales preciosos, ya que, aparte de que su contenido es mínimo en cada una de las PCB, estos metales son dúctiles y se pierden al impregnarse en la maquinaria utilizada en el proceso de molienda.



Figura1. Proceso industrial de reciclaje de aparatos eléctricos y electrónicos (DAEE). (Fuente: Tesista)

En este trabajo se presenta una modificación al proceso de separación de la placa metálica de la fibra de vidrio, por medio de un proceso de separación fisico-química, denominado flotación.

### 1.3 OBJETIVO GENERAL

Optimizar el proceso de separación por flotación determinando los valores óptimos de las variables en el proceso de flotación mediante un diseño y análisis de experimentos para separar la fibra de vidrio a partir de la mezcla placa metálica-fibra de vidrio, obtenida de la degradación de la resina mediante el proceso SM.

#### 1.3.1 Objetivos Particulares

Evaluar el efecto de cada una de las variables;

- La velocidad de agitación (RPM).
- La dosificación del espumante (ppm).
- Contenido de sólidos (%).

Durante la separación de la fibra de vidrio a partir de la mezcla de fibra de vidrio-placa metálica.

- Simular un circuito de flotación.

### 1.4 JUSTIFICACIÓN

Los principales intereses en recuperar los materiales que conforman las PCB, son el beneficio económico y el ambiental. La composición química de las PCB, dependen del dispositivo electrónico en el que serán instaladas, por ejemplo; una composición estimada de metales preciosos típica en PCB, en teléfonos celulares se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Composición estimada de metales preciosos contenidos en las PCB a partir de una tonelada de teléfonos celulares en desuso, la cantidad por tonelada del metal correspondiente obtenido a partir una tonelada de mineral y su precio en el mercado en dólares de acuerdo a la LME. (Fuente: Tesista)

Metales preciosos (g/ton)	Contenido en PCB (g/ton)	Contenido en mineral (g/ton)	Precio (millones de Dlls/ton)*
Au	250	1	49
Ag	1 000	1 000	1.06
Pd	110	-	26.8
Pt	3	-	60.65
Cu	200 000	50 000	0.009211

\*Precios de los metales son de London Metal Exchange Office (LME), 14 de diciembre de 2010.

Es importante subrayar que los contenidos de algunos materiales, especialmente los metales preciosos, están en cantidades superiores a los encontrados en minerales.

La disposición final de estos DAEE no serán los basureros, donde además de disminuir la capacidad volumétrica, contribuyen a la contaminación tanto de suelos como de aguas (superficiales y subterráneas), ya que contiene metales pesados; plomo (Pb), estaño (Sn), cadmio (Cd) y polímeros tóxicos que pueden ser particularmente nocivos o perjudiciales para el ser humano.

Debido a todo lo anterior, es necesaria la mejora continua de los procesos ya existentes en el reciclado de las PCB.

En este trabajo se presenta una modificación del proceso de separación de las PCB, mediante la incorporación del proceso de flotación al circuito tradicional (Figura 2).



Figura 2. Proceso de reciclaje de PCB que se propone. (Fuente: Tesista)

El proceso de flotación fue originalmente desarrollado para la separación de minerales, en donde se tiene que reducir el tamaño de partícula hasta tamaño micrométrico. Ello se realiza con el único objetivo de liberar los metales de interés que están inmersos en otros materiales que no son económicamente costables (por ejemplo 0.5 g de Au/ Ton de mineral). La recuperación de metales preciosos de las PCB, se ve seriamente afectado por la disminución de tamaño de partícula. Debido a esto, se propone emplear el proceso SM (que consiste en separar químicamente; la placa metálica, de la fibra de vidrio y la resina) y el proceso de flotación empleando fragmentos cuadrangulares de PCB del orden de 5 mm.

## 1.5 DELIMITACIONES

1. Este trabajo se limita solo a la optimización del proceso de separación por flotación. El proceso de reciclaje de PCB consta de la recolección de materia prima (DAEE), desensamble, corte de PCB, separación mediante SM y separación final de los materiales por flotación.
2. El estudio experimental de esta investigación se realizó bajo las condiciones (equipo, maquinaria, reactivos) que se encuentran en el Instituto de Minería de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

# **CAPÍTULO II**

## **ANTECEDENTES**

## 2.1 GENERALIDADES

Como resultado del desarrollo tecnológico la producción de equipos eléctricos y electrónicos (EEE) se incrementa de manera vertiginosa en el mundo, y sus desechos (DAEE), lo cual presenta un nuevo desafío económico y medioambiental (He et al., 2006; Khetriwal et al., 2009). En la Unión Europea se generan cada año unas 8 millones de toneladas de DAEE, con un crecimiento anual de 5.3 % (Drechse, 2006) y entre 20 y 50 millones de toneladas en el resto del mundo (Petranikova, 2008). Particularmente la Unión Europea ha creado las primeras directivas para incorporar el creciente aumento de los DAEE en las normativas de Restricción de Sustancias Peligrosas (RoHS). Debido a la fuerza de estas directrices, la industria manufacturera debe innovar para que su proceso no tenga desechos (es decir, cero residuos) en el ciclo de vida de los productos en Europa (Kumar et al., 2005). Desafortunadamente la mayoría de los países en desarrollo no han introducido tales regulaciones en el manejo de los residuos (Nnorom y Osibanjo, 2008). En la normativa de los DAEE se definen a los equipos eléctricos como aquellos que dependen de la corriente eléctrica o campos electromagnéticos para funcionar y a los equipos electrónicos como los que se emplean para la generación, transferencia o medir tales corrientes y campos. Una amplia gama de productos se clasifican como equipos eléctricos y electrónicos, incluyendo los electrodomésticos grandes y pequeños, como los refrigeradores, lavadoras y aire acondicionado, equipos de tecnología de información, videojuegos, celulares y dispositivos electrónicos portátiles de vídeo; productos tales como televisores, videocámaras y las combinaciones de TV/VCR, equipos de audio, incluyendo reproductores de discos compactos y sistema modular de audio. Una vez que estos productos llegan al final de su vida útil, se convierten en residuos electrónicos o DAEE (Babu et al., 2007; Lee et al., 2007).

Los DAEE contienen una gran variedad de sustancias orgánicas e inorgánicas. La composición química depende en gran medida del tipo, fabricante y edad del equipo (Tabla 2). Pueden contener hasta 61% de metales y 21% de

plásticos (Widmer et al., 2005), de éstos los más típicos son el polietileno, el polipropileno, poliésteres y policarbonatos (Gramatyka et al., 2007). Muchos de los materiales presentes en los DAEE como sustancias cloradas y bromadas, metales tóxicos, materiales foto y biológicamente activos, ácidos, plásticos y aditivos de plásticos son altamente tóxicos.

Por otra parte, los DAEE son una fuente importante de metales básicos y preciosos con alto potencial económico (Tabla 3) (Lehner, 1998; Bleiwas y Kelly, 2001; He et al., 2006; Li et al., 2007; Huang et al., 2009; Guo et al., 2009; Yoo et al., 2009; Deveci et al., 2010). Por ejemplo, las PCB de una computadora, se estima que pueden contener valores superiores al 20% de cobre y 250 g de oro/ton, lo cual es significativamente alto, es decir, de 20 a 40 veces más de cobre y de 25 a 250 veces más de oro en comparación con las fuentes naturales; las minas, ya que por lo regular éstos contienen ~0.5 a 1% en el caso de los minerales de cobre y de oro ~ 1 a 10 g/ton. También el reciclaje es una opción para reducir el impacto al medio ambiente por parte de los DAEE, el cual permite la recuperación de la parte metálica como de la parte no metálica que los componen (Cui y Zhang, 2008; Havlik et al., 2010; Yazici et al., 2010).

La tarjeta de circuitos impreso es la parte esencial de los dispositivos electrónicos que contienen la fracción más importante de los metales presentes en los DAEE. Como se muestra en la Tabla 3 las PCB son particularmente ricas en cobre y en metales preciosos (Tuncuk et al., 2012), lo cual en particular, contribuye al interés sobre el potencial económico de todos los DAEE.

Tabla 2. Materiales que componen un DAEE (Tuncuk et al., 2012).

<b>Material</b>	<b>Contenido (%)</b>
<i>Metales</i>	
Hierro y acero	47.9
Cobre	7.0
Aluminio	4.7
No ferrosos	1.0
<i>Total</i>	<b>60.6</b>
<i>Plásticos</i>	
Plásticos retardadores de flama	5.3
Plásticos que no generan llama	15.3
<i>Total</i>	<b>20.6</b>
Vidrio	5.4
Caucho	0.9
Madera y madera contrachapada	2.6
Cerámicos	2.0
<b>Tarjetas de circuitos impresos (PCB)</b>	<b>3.1</b>
Otros	4.6

Tabla 3. Contenido de metales de interés y valor de los DAEE comparado con minerales típicos de los metales (Tuncuk et al., 2012).

Tipo de desecho electrónico	Contenido y contribución al potencial económico (%) (entre paréntesis)				Referencia
	Cu (%)	Au (g/ton)	Ag (g/ton)	Pd (g/ton)	
Precio (Dlts/ton)*	9211	4.9x10 <sup>7</sup>	1.06x10 <sup>6</sup>	2.68x10 <sup>7</sup>	
PCB	20 (10)	250 (64)	1000 (5)	110 (15)	Hagelüken (2006a)
PCB	18.5 (10)	86 (26)	694 (4)	309 (51)	Yazıcı et al. (2010)
Tarjetas de TV**	9.2 (61)	3 (11)	86 (7)	3.7 (7)	Deveci et al. (2010)
Tarjetas de TV	10 (28)	20 (30)	280 (9)	10 (8)	Hagelüken (2006a)
Teléfonos móviles	13 (5)	350 (67)	1380 (6)	210 (22)	Hagelüken (2006a)
Grado típico del mineral	0.5	1	-	-	

\*Precios de los metales son de London Metal Exchange Office (LME), 14 de diciembre de 2010.

\*\*Desechos de manufactura sin componentes.

## 2.2. TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE METALES

La naturaleza tan compleja y heterogénea de los DAEE (por ejemplo, diversos metales y asociaciones de metales-no metales), es uno de los obstáculos para la recuperación de los materiales (Cui y Frossberg, 2003; Yazici et al., 2010). Se han propuesto varias opciones basadas en la mecánica convencional, la física y procesos piro e hidrometalúrgicos para la recuperación de los metales a (Cui y Zhang, 2008; Akcil et al., 2009; Yazici y Deveci, 2009). En la Figura 3 se muestra un diagrama de flujo que ilustra los procesos disponibles para la recuperación de metales a partir de los DAEE. El factor más importante que afecta la eficiencia del

proceso para el reciclaje y la recuperación de los materiales contenidos en los DAEE es la pérdida de los metales preciosos, debido al proceso de pulverización.

Los procesos de reducción de tamaño y separación física en húmedo y en seco tienen un impacto relativamente bajo, generando efluentes contaminados y generación de polvos. Por otro lado, los procesos hidrometalúrgicos usan una gran cantidad de sustancias tóxicas, tanto ácidas como básicas o bien reactivos inflamables y generan una gran cantidad de desechos sólidos y efluentes. Sin embargo, hay diversos métodos disponibles para limpiar los efluentes y cumplir con las regulaciones ambientales establecidas. El reciclaje de los DAEE disminuye el volumen del relleno sanitario, mitiga y previene la contaminación de suelo, aguas subterráneas y el aire, debido a la liberación de sustancias peligrosas de los componentes. Además, el tratamiento de residuos electrónicos reduce la huella de carbono y otros materiales, por ejemplo, la huella de carbono producida al obtener 1 kg de cobre es de casi 4 kg de CO<sub>2</sub> (Hayes, 1993). De la misma manera, se produce una reducción importante al reciclar el oro proveniente de los DAEE, ya que es uno de los materiales con la huella de carbono más grande; 50 veces la del cobre y 5000 veces la del aluminio (US Geological Survey, 2007; Groot y Pistorius, 2008). Debido a lo anterior, se sugiere que los esfuerzos se centren principalmente en el reciclaje de metales como el oro, plata, platino, paladio, estaño, níquel, cobre y plomo (Groot y Pistorius, 2008) para hacer este proceso sustentable.

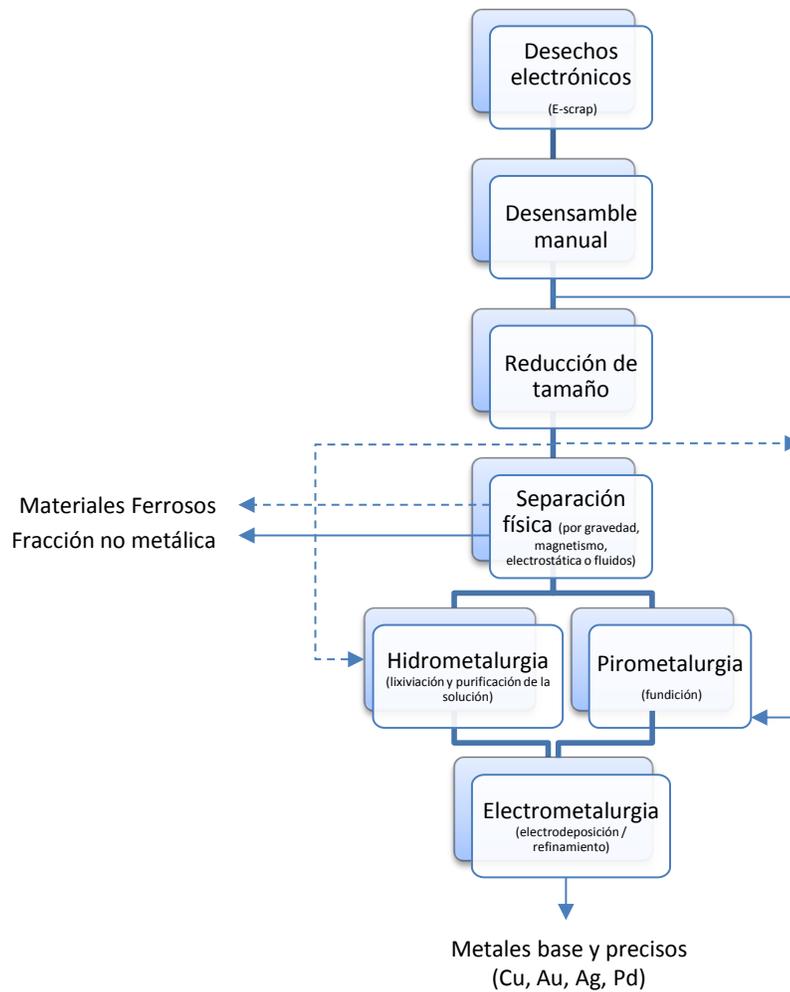


Figura 3. Representación esquemática de diagrama de flujo que presenta las opciones potenciales del proceso para la recuperación de metales de desechos electrónicos (Tuncuk et al., 2012).

### 2.2.1. Pretratamiento

Para reciclar los metales preciosos de los residuos electrónicos por métodos piro e hidrometalúrgicos, es necesario un pre-tratamiento mecánico (Yoo *et al.*, 2009). Los diferentes componentes y dispositivos pueden ser seleccionados y separados en varias fracciones como, metales (hierro, cobre, aluminio, magnesio, etc.), plásticos, cerámicos, papel, madera, así como capacitores, baterías, cinescopios, LCD, y PCB (Antrekowitsch *et al.*, 2006). Estos

componentes pueden ser reutilizados o bien enviados directamente al proceso de reciclaje. El proceso de desmantelamiento también permite la remoción de componentes peligrosos y la pre-concentración de materiales que incrementen el valor económico de los desechos y su facilidad para reciclarlos (Cui y Forssberg, 2003).

Después de la eliminación y clasificación de los componentes, las partes que contienen metal, tales como las PCB se someten a una reducción de tamaño antes del proceso de recuperación de la fracción metálica de éstos. Generalmente se emplean trituradoras y molinos de martillos para fragmentar, moler, rasgar o romper los residuos (Dalrymple *et al.*, 2007). El grado de reducción de tamaño depende del proceso de recuperación seleccionado, ya que el material relativamente grueso puede ser fácilmente fundido, mientras que tamaño fino es intrínsecamente necesaria para una eficiente recuperación de metales por separación física e hidrometalúrgica (Duan *et al.*, 2009). A este respecto, Zhang y Forssberg (1997) publicaron que la liberación total del cobre de desechos de PC y PCB, se podría lograr a un tamaño de partícula de <2 mm y que en fracciones de mayor tamaño se muestra una baja liberación de valores, debido a que por lo general hay una asociación entre alambres pequeños de cobre y el plástico, además del encapsulamiento parcial de segmentos de cable de cobre dentro de plásticos.

## 2.2.2. Separación

### 2.2.2.1. Proceso de separación física

En el Anexo 1 se presenta una gran variedad de materiales que contienen los DAEE, los cuales tienen diferentes propiedades físicas (gravedad específica, susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica, etc.) que pueden ser fácilmente empleadas para separar los metales esencialmente de los componentes no metálicos y otros (Zhang y Forssberg, 1998; Cui y Forssberg, 2003).

En la Tabla 4 se muestran algunos ejemplos de los procesos que utilizan las diferencias físicas para separar los metales de los plásticos. Al respecto, la aplicación de diferentes métodos de separación incluyen separación por gravedad (Galbraith y Devereux, 2002), separación magnética (Zhang y Forssberg, 1997), separación electrostática (Zhao et al, 2004; Li et al., 2007), y clasificación por corrientes de Foucault (Li et al., 2004), las cuales se han empleado para la recuperación de metales de los DAEE. En la Figura 4 se muestra un diagrama de flujo de un circuito de separación física para la eliminación de componentes de gran tamaño: los metales ferrosos y los no metales mediante clasificación manual, dos etapas de separación magnética y una de separación por corrientes de Foucault, previo a la fundición de metales base y preciosos.

Tabla 4.- Métodos de separación física y su potencial para la recuperación de metales de los DAEE (Cui y Forssberg, 2003; Zhang y Forssberg, 1988).

Método de separación	Criterio de separación	Metales a ser separados
Gravimétrica	Gravedad específica	Metales de los plásticos
Magnética	Susceptibilidad magnética	Metales ferrosos, ferromagnéticos de los no magnéticos
Electrostática	Conductividad eléctrica	Metales base y preciosos de los no metales
Corrientes de Foucault	Conductividad eléctrica y densidad	Metales no ferrosos de los no metales

Los procesos de separación física se caracterizan por un alto costo de inversión en la compra de equipo y costo de operación. Como consecuencia de las etapas de trituración y pulverización, la mezcla de DAEE necesita más etapas y equipos asociados en su separación, para simplemente obtener una fracción con un mayor contenido de metales (FM) y fracción con un mayor contenido de no metales (FNM) Como ya se mencionó uno de los mayores inconvenientes es la

pérdida de los metales preciosos Au, Ag, Pd, Pt, la cual está entre el 10 y el 35% (Tuncuk *et al.*, 2012). Las principales razones se basan en la liberación insuficiente de los metales, debido a la asociación de los metales valiosos con los plásticos. Al respecto, algunos autores sugieren que la recuperación de metales preciosos se ve afectada por la generación de finos (partículas menores a 75  $\mu\text{m}$ ) durante la reducción de tamaño y por la ineficiencia de los procesos de separación a partir de esas partículas (Goosey y Kellner, 2002; Zhao *et al.*, 2004; Ogunniyi y Vermaak, 2007, Ogunniyi y Vermaak, 2009). Después de los tratamientos mecánicos/físicos las fracciones enriquecidas se tratan adicionalmente por procesos piro e hidrometalúrgicos para la extracción de metales tales como Cu, Ni, Sn, Zn, Pb.

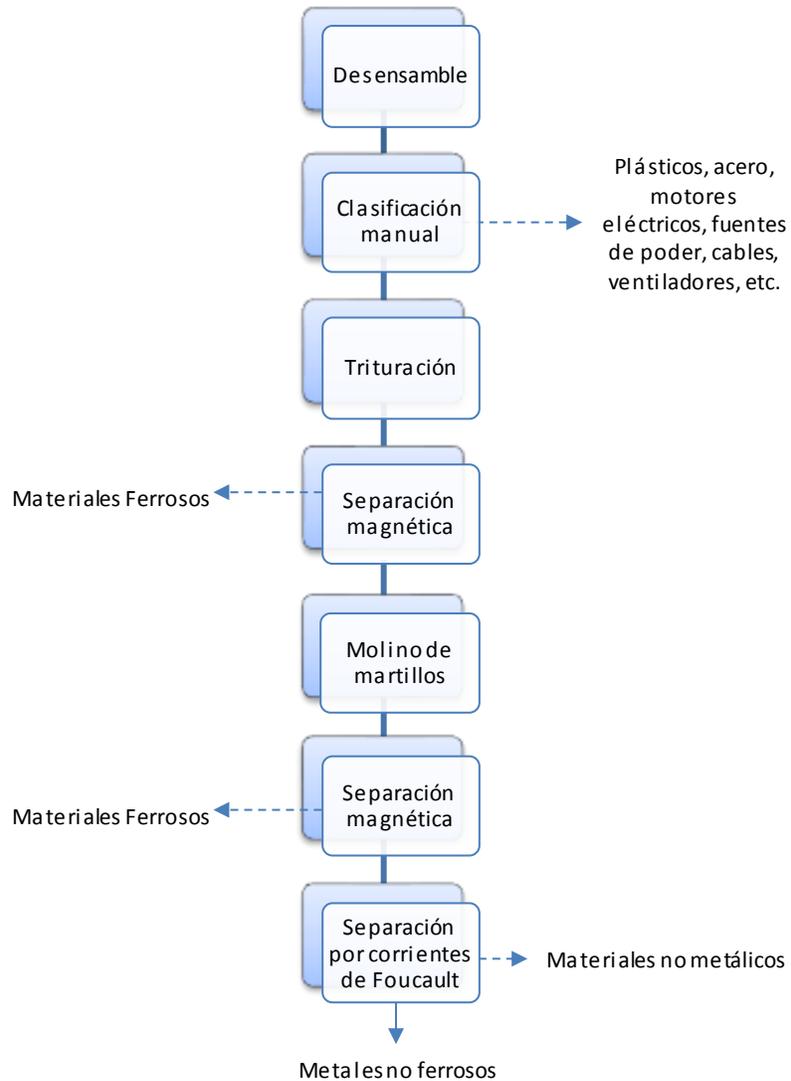


Figura 4.- Diagrama de flujo típico para la recuperación de metales no ferrosos provenientes de los DAEE antes de la fundición. (Tuncuk et al., 2012).

#### 2.2.2.2. Proceso físico-químico

La generación de polvo es uno de los inconvenientes de los procesos físicos. Además de ser un factor de contaminación ambiental, también puede ser causante de pérdidas económicas, ya que cuando los polvos no son procesados se pueden perder cantidades importantes de metales base y preciosos. La flotación es una opción de tratamiento para la separación de las partículas finas generadas por el pre tratamiento y los procesos físicos, ya que puede separar selectivamente la fracción metálica (FM) de la no metálica (FNM) antes de entrar a los tratamientos posteriores.

##### 2.2.2.2.1 La Flotación

La flotación es una técnica de concentración empleada en la obtención de minerales, donde se aprovechan las propiedades físico-químicas de las partículas para efectuar su separación (Hester y Harrison, 2009). El proceso consiste en tener una suspensión de agua y partículas minerales (<150  $\mu\text{m}$ ), que se pone en contacto con un enjambre de burbujas (Figura 5). Al efectuarse el contacto entre la suspensión y las burbujas de aire, las partículas hidrofóbicas se adhieren a la superficie de las burbujas y comienzan su camino ascendente hasta llegar al rebose de la celda de flotación, donde son removidas mecánicamente y enviadas para continuar con otras etapas del proceso hasta la obtención del producto deseado. Las partículas hidrofílicas se retiran de la máquina de flotación por la parte inferior.

Para llevar a cabo el proceso de flotación, se emplean tres tipos de reactivos químicos: colectores, espumantes y modificadores.

1. Los colectores son sustancias orgánicas que se adsorben en la superficie de las partículas, confiriéndole a ésta características hidrofóbicas, es decir, repelencia al agua.

2. Los espumantes son agentes tensoactivos que se adicionan con el objetivo, de disminuir la tensión superficial del agua, de estabilizar la espuma, evitar el fenómeno de coalescencia (unión de dos o más burbujas) y mejorar la cinética de interacción burbuja-partícula.
3. Los reactivos modificadores se emplean para intensificar o reducir la acción de los colectores sobre las partículas. Comúnmente se les conoce como activadores, depresores o modificadores de pH (Green y Perry, 2009).

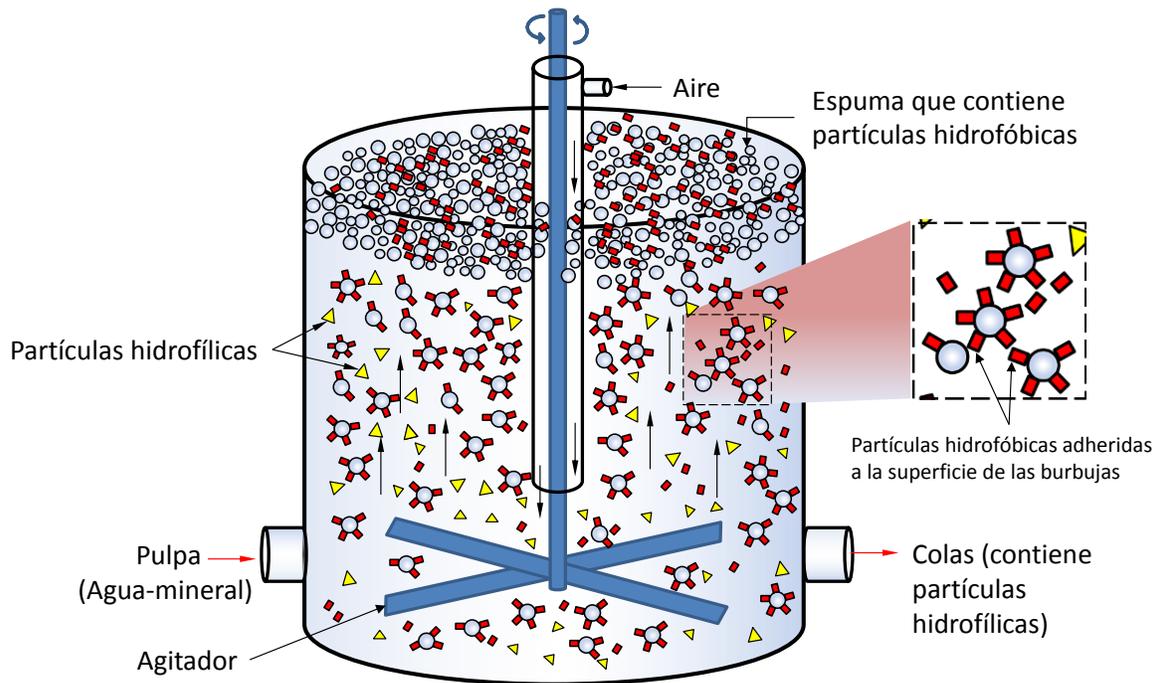


Figura 5.- Representación esquemática del proceso de flotación. (Green y Perry, 2009).

## 2.2.3 Recuperación de metales

### 2.2.3.1. Procesos Pirometalúrgicos

La pirometalurgia es una tecnología tradicional de recuperación de metales, así como de metales preciosos de los DAEE. Alrededor del mundo hay varias plantas pirometalúrgicas que se dedican al tratamiento de estos desechos (Umicore, 2011). La operación de estas plantas, está enfocadas a la producción de lingotes de cobre con valores de metales preciosos. Un proceso típico, consiste en la fundición del metal enriquecido para la obtención de lingotes, los cuales se someten a refinación electrolítica para obtener cobre de alta pureza. Los “lodos” de cobre recogidos en la electrorefinación se refinan nuevamente para recuperar los metales preciosos, los cuales incluyen Ag, Au, Pt, Pd, Rh Ru e Ir. (Figura 6). Los procesos pirometalúrgicos pueden considerarse potencialmente adecuados para el tratamiento de los DAEE en donde los componentes orgánicos pueden sustituir parcial o totalmente al coque, el cual actúa como combustible y agente reductor (Hagelüken, 2006a; Cui y Zhang, 2008). Sin embargo, se considera que este proceso es de uso intensivo de energía, alto costo y con requerimientos particulares en cuanto al grado de metales en la alimentación; rico en cobre y metales preciosos. Por otra parte, los retardadores de flama halogenados empleados en la fabricación de PCB, conducen a la formación de dioxinas y furanos, metales volátiles y polvo que pueden traer problemas ambientales, por lo tanto, es necesario un tratamiento previo como la desgasificación (Hagelüken, 2006b).



del metal. Puesto que los elementos metálicos en las PCB están cubiertos o encapsulados por diversos materiales, ya sean poliméricos o cerámicos, el pretratamiento necesario es la reducción de tamaño para exponer los metales de interés a la acción de la lixiviación y por tanto facilitar su extracción (Cui y Zhang, 2008; Gramatyka *et al.*, 2007; Dalrymple *et al.*, 2007; Yoo *et al.*, 2009).

Una de las particularidades más importantes de los DAEE es la presencia de metales nativos y/o aleaciones, las cuales determinan en gran medida la selección del proceso de lixiviación. En general, el proceso oxidativo que se requiere para la extracción eficiente de los metales base o preciosos de interés está dado de acuerdo a las siguientes ecuaciones:



En la Figura 7 se presenta la disolución del cobre ( $Cu^0$ ) obtenido de los desechos de tarjetas de TV en ausencia y presencia de  $H_2O_2$  como oxidante en medios sulfatados ácidos (Deveci *et al.*, 2010), la cual muestra una muy limitada extracción de cobre (~ 2%) en ausencia del oxidante, y una extracción del 60% en presencia del  $H_2O_2$ .

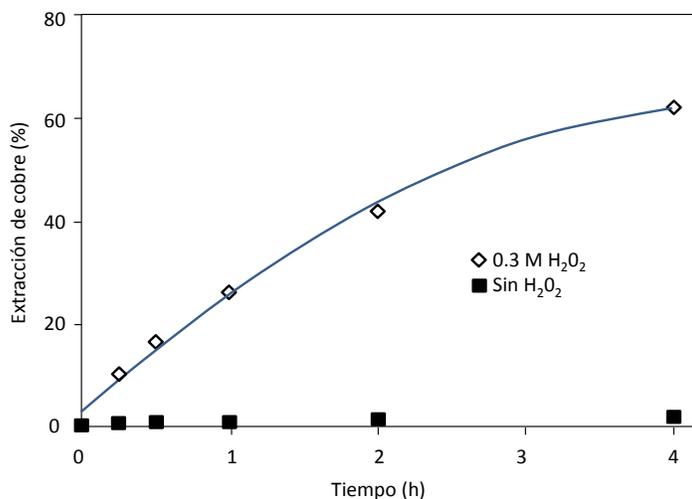


Figura 7.- Efecto de la presencia del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sobre la extracción del cobre.

La lixiviación ácida en presencia de un oxidante es empleada ampliamente para la extracción de cobre de las PCB (Yazici y Deveci, 2009). Dado que los metales preciosos contribuyen significativamente al valor de los DAEE, su extracción es de gran importancia económica en el proceso de reciclado. Por lo tanto, los procesos hidrometalúrgicos están principalmente enfocados a éstos. Los agentes de lixiviación más comunes para la recuperación de metales preciosos incluyen el cianuro, haluros, tiourea y tiosulfatos (Kolodziej y Adamski, 1984; Chmielewski *et al.*, 1997; Shibata y Matsumoto, 1999; Quinet *et al.*, 2005; Sheng y Etsell, 2007; Lee *et al.*, 2010). Las soluciones impregnadas se someten entonces a una separación sólido/líquido y a procedimientos de purificación, tales como la precipitación de impurezas, extracción por solventes, adsorción y de intercambio iónico antes de la recuperación de los metales puros (Cui y Zhang, 2008; Huang *et al.*, 2009).

# **CAPÍTULO III**

# **EXPERIMENTACIÓN**

En este capítulo se describe como se determinaron las variables y sus niveles estudiados en esta investigación, así como los materiales y equipos que fueron empleados para la separación de metal y fibra de vidrio de las PCB.

### 3.1 MATERIALES Y REACTIVOS

Como materia prima se emplearon fragmentos de PCB (Figura 8), los cuales se obtuvieron cortando PCB de DAEE. Estos fragmentos, fueron procesados para separar los componentes de las PCB, tales como, metal, fibra de vidrio y resina. Es importante señalar que esta última es la que mantiene unidos a los demás materiales. Finalmente se obtiene un producto, como el que se muestra en la Figura 9. En ésta se puede apreciar la cantidad de formas, tamaños y componentes presentes.

Como se mencionó en los antecedentes para que se lleve a cabo la separación mediante flotación, es necesario adicionar algunos reactivos químicos. En este trabajo se empleó Dodecilamina ( $C_{12}H_{27}N$ , Aldrich, 98%) como agente colector, Metil Isobutil Carbinol (4-metil-2-pentanol, Sigma Aldrich, 98%) como espumante e hidróxido de sodio (NaOH, JT Baker, 98.4%) para fijar el pH.



Figura 8. Fragmentos de PCB.

(Fuente: Tesista)



Figura 9. Producto tratado por SM.

(Fuente: Tesista)



Figura 10. Dodecilamina.  
(Fuente: Tesista)



Figura 11. Metil Isobutil Carbinol.  
(Fuente: Tesista)



Figura 12. Hidróxido de sodio.  
(Fuente: Tesista)

### 3.2 APARATO EXPERIMENTAL

Existe una gran variedad de máquinas de flotación para laboratorio. Las celdas de flotación tipo Denver D-1 y D-12 son las más comunes (Figura 13). Estas celdas están equipadas con varios contenedores de diferentes capacidades y se emplean principalmente para ajustar las condiciones de operación en las plantas industriales.

Para la experimentación del presente trabajo se utilizó una máquina de flotación tipo Denver D-12, provista de un contenedor de acrílico transparente con capacidad de 4.5 L.

En la Figura 13 se muestran las partes principales de la celda de flotación. El funcionamiento de esta celda consiste en colocar la carga (material, agua y reactivos) en el contenedor y posteriormente bajar el agitador. El proceso de flotación inicia cuando se pone en marcha el agitador y se abre la válvula de aire. Este mecanismo es de auto-aireación, es decir, el aire se introduce a baja presión por la flecha del impulsor, debido a su movimiento. El impulsor gira dentro de mamparas, las cuales sirven para distribuir homogéneamente la carga y para fraccionar el aire en diminutas burbujas. Todo este proceso genera una zona de gran turbulencia que es necesaria para que se dé el contacto burbuja-partícula. Una vez que ocurre dicho contacto, debe de haber una zona de quietud, en donde las burbujas ascienden sin que la turbulencia les haga perder su carga. Finalmente las burbujas cargadas llegan a la zona de espuma, donde son removidas para ser enviadas a otra parte del proceso.

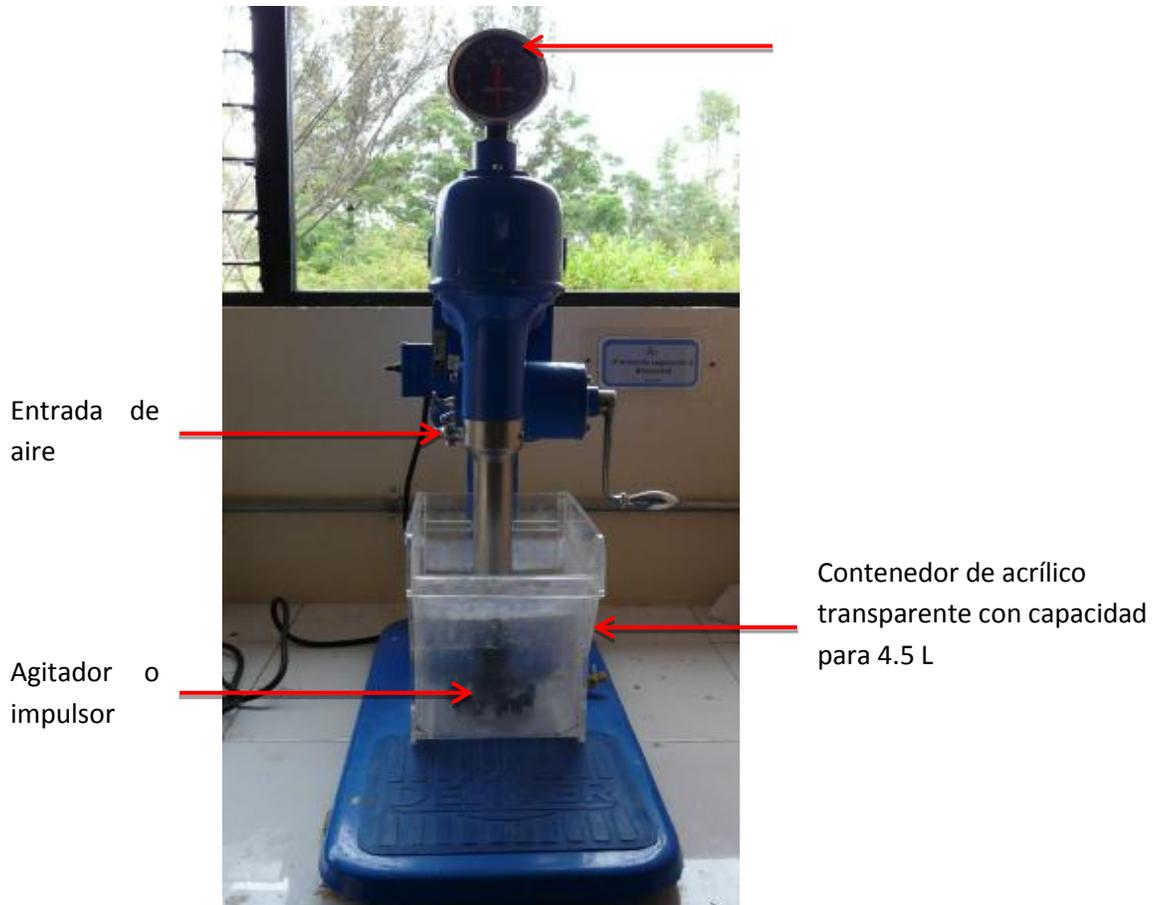


Figura 13. Máquina de flotación tipo Denver D-12. (Fuente: Tesista)

Complementan el aparato experimental un termómetro digital (Figura 14) para monitorear la temperatura, un potenciómetro (Figura 15) para medir el pH. Además, se emplearon una balanza analítica con capacidad de 210 g (Figura 16) para pesar el colector (mg) y una granataria de capacidad de 3 kg (Figura 17) para pesar el material obtenido del proceso de flotación, así como probetas (Figura 18) para medir el agua, un cronómetro (Figura 19) para monitorear el tiempo y una resistencia eléctrica (Figura 20) para elevar la temperatura del agua.



Figura 14. Termómetro digital.  
(Fuente: Tesista)



Figura 15. Potenciómetro.  
(Fuente: Tesista)

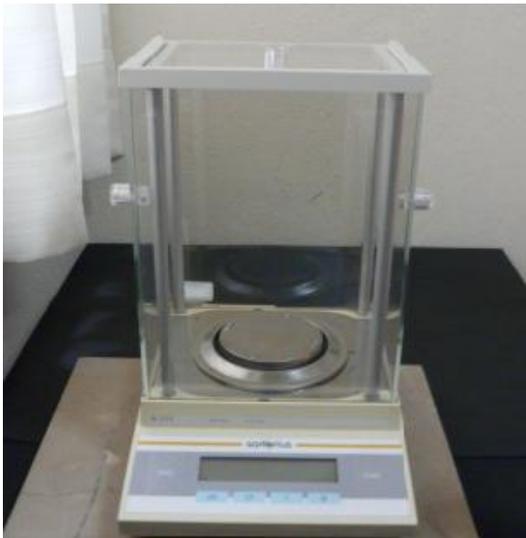


Figura 16. Balanza analítica.  
(Fuente: Tesista)



Figura 17. Balanza granataria.  
(Fuente: Tesista)

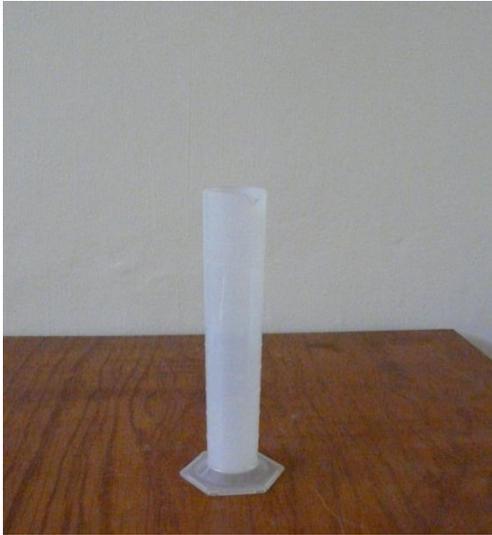


Figura 18. Probeta.  
(Fuente: Tesista)



Figura 19. Cronómetro.  
(Fuente: Tesista)



Figura 20. Resistencia eléctrica.  
(Fuente: Tesista)

### 3.3 ANÁLISIS DE MATRIZ DE PRIORIDADES PARA LA SELECCIÓN DE MÉTODO DE SEPARACIÓN

META: Obtener el mejor método de separación entre las diferentes alternativas que cumpla con las características del trabajo.

Tabla 5. Análisis de matriz de prioridades para la selección de método de separación. (Fuente: Tesista)

Objetivo	Criterios	Alternativas
Separación de materiales contenidos en las PCB	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Costeabilidad del proceso.</li> <li>2. Disponibilidad de Recursos</li> <li>3. Calidad</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Gravimétrico</li> <li>2. Magnético</li> <li>3. Electrostático</li> <li>4. Corrientes de Foucault</li> <li>5. Flotación</li> </ol>

Se realizó una matriz de prioridades para seleccionar el método por el cual se trabajaría. La matriz de prioridades es un método estructurado para ordenar una lista de alternativas de acuerdo a sus ventajas (Izar, 2004). Consiste en calificar las acciones basándose en el tiempo que toma realizarlas, el costo, la importancia para la calidad, y la disponibilidad de recursos, los cuales son ideales para este trabajo. Esta herramienta puede ser utilizada para priorizar estrategias y acciones como parte del desarrollo de un plan de acción (*Cambridge, MA: Management Sciences for Health, 2007*).

Los criterios a analizar en la matriz de prioridades son los siguientes:

1. Costeabilidad del proceso.  
Utilizar el método que sea menos costoso con la finalidad de reducir costos durante la operación del proceso.

2. Disponibilidad de recursos.

Tomar en cuenta los recursos (Material a trabajar, maquinaria y herramienta de trabajo) con los que se encontraron disponibles para realizar este trabajo en el laboratorio de minería de la UTM.

3. Calidad (Pérdida de valores metálicos).

Elegir el método en donde se puedan recuperar mayores porcentajes de fracciones metálicas y no metálicas.

Por lo tanto se realizaron 3 matrices:

CARACTERÍSTICA: COSTEABILIDAD DEL PROCESO (Fuente: Tesista).

	1			
2	1	2		
3	1	2	3	
4	1	2	3	4
5	1	5	5	5

Alternativa	1	2	3	4	5
Conteo	4	2	1	0	3
Orden	1°	3°	4°	5°	2°

CARACTERÍSTICA: DISPONIBILIDAD DE RECURSOS (Fuente: Tesista).

	1			
2	1	2		
3	1	2	3	
4	1	2	3	4
5	1	5	5	5

Alternativa	1	2	3	4	5
Conteo	4	2	1	0	3
Orden	1°	3°	4°	5°	2°

CARACTERÍSTICA: CALIDAD (Fuente: Tesista).

	1			
2	2	2		
3	3	3	3	
4	4	4	4	4
5	5	5	5	5

<b>Alternativa</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Conteo</b>	0	1	2	3	4
<b>Orden</b>	5°	4°	3°	2°	1°

### SUMA TOTAL

<b>Alternativa</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Conteo</b>	8	5	4	3	10
<b>Orden</b>	2°	3°	4°	5°	1°

Por lo tanto se concluye que el método con mayor viabilidad para realizar es el de flotación con una diferencia de +2 sobre el método gravimétrico.

### 3.4 PRUEBAS PRELIMINARES

Para definir las variables que se estudiaron en este trabajo, se realizaron pruebas preliminares con dos lotes de PCB obtenidas del proceso SM. En éstas se determinaron los parámetros de operación, las cuales muestran tendencias y comportamientos esperados en el proceso de flotación. Así mismo, se obtuvieron los niveles de cada una de estas variables para realizar el proceso de flotación, con la finalidad de determinar los valores óptimos del proceso y de esta manera optimizar la separación por flotación.

### Concentración de espumante:

La función que desempeñan los espumantes dentro del proceso de flotación es la de generar espumas estables y con tamaños de burbujas homogéneo (Melo y Laskowski, 2005). En la Figura 21 se muestra el efecto de la concentración de espumante sobre el tamaño de la burbuja, en donde se pueden apreciar dos fenómenos que definen el tamaño de la burbuja: la coalescencia (dos dominios de fase de composición esencialmente idéntica entran en contacto para formar un dominio de fase mayor) de burbujas y la velocidad de agitación de la celda. Al incrementar la concentración de espumante, se disminuye el grado de coalescencia de burbujas y a una concentración particular (CCC, concentración crítica de coalescencia) se previene éste fenómeno. Es importante mencionar, que el tamaño de burbuja permanece constante aún y cuando se incremente la concentración de espumante por encima del punto CCC.

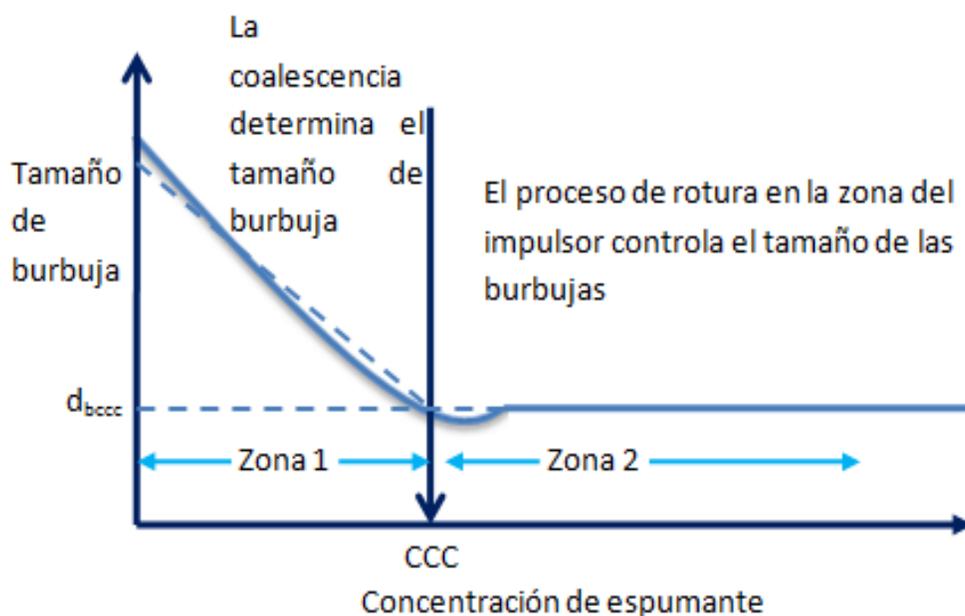


Figura 21. Representación esquemática del efecto de la concentración de espumante sobre el tamaño de burbuja (Melo y Laskowski, 2005).

Uno de los espumantes frecuentemente empleados en el proceso de flotación es el Methyl Isobutyl Carbinol (MIBC), debido a sus características no colectoras (no interactúa con el mineral) y a su bajo costo. Las concentraciones

empleadas van de 1 hasta 30 ppm (Melo y Laskowski, 2005). Por lo tanto, en este trabajo se sugiere emplear 5, 15 y 30 ppm.

### **Velocidad de agitación:**

La agitación dentro de la celda de flotación es necesaria para (Kelly y Spottiswood, 1990):

- Mantener todas las partículas en suspensión
- Asegurar de que todas las partículas tengan la oportunidad de ser flotadas
- Dispersar las burbujas en el seno de la pulpa y promover el contacto burbuja partícula

En este trabajo se propuso evaluar el proceso con diferentes velocidades de agitación, ya que es uno de los parámetros que se pueden variar fácilmente y obtener mejores recuperaciones. Adicionalmente está relacionada la velocidad de agitación a la cantidad y tamaño de burbujas que se generan en la celda de flotación.

### **Contenido de sólidos:**

Se realizaron pruebas preliminares para determinar si existe influencia del contenido de sólidos en la celda sobre la recuperación. En la Figura 22 se muestran los resultados que se obtuvieron al procesar porcentajes aleatorios entre 0 y 5% debido a que este rango es en donde se puede controlar el proceso. Se inició con 0.5% de sólidos con respecto a la masa y se obtuvo una recuperación del 33%, se fue incrementando hasta el 4.5% donde se observó una notoria tendencia a disminuir la recuperación conforme se iba aumentando el porcentaje de sólidos. Donde hubo una mejor recuperación fue en el 1 y 3% de sólidos. Por todo lo anterior, se propuso trabajar con 1 y 3% de sólidos.

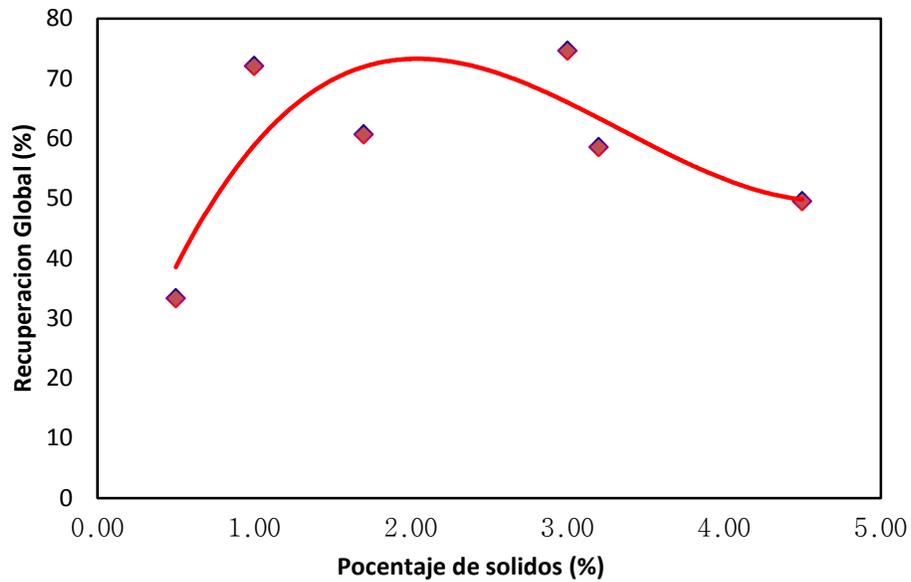


Figura 22. Recuperación de materiales variando los porcentajes de sólidos. (Fuente: Tesista)

Los parámetros que intervienen en el proceso son:

- ✚ Concentrado de sólidos (%)
- ✚ Concentrado de espumante (ppm)
- ✚ Velocidad (rpm)
- ✚ Concentración de colector (mg)
- ✚ Agua (litros)
- ✚ Temperatura = 30 °C
- ✚ pH = 9.5
- ✚ Tiempo de flotación = 1 min

Cabe señalar que los últimos tres parámetros se mantienen constantes ya que son los valores adecuados con los cuales se debe de trabajar para obtener buenas recuperaciones de material (Gallegos-Acevedo *et al.*, 2006. Mientras que el colector depende de la cantidad de sólidos con los que se trabajara:

$$\frac{0.12 \text{ gr de dodecilamina}}{\text{Kg de material a trabajar}}$$

Por lo tanto, los parámetros: concentración de sólidos (%), concentración de espumante (ppm) y velocidad de agitación (RPM) son los que se estudiaron para determinar el nivel más adecuado de operación para cada uno de ellos.

### **Variables de operación:**

Para el diseño de experimentos se tomaron en cuenta las siguientes pautas generales (Montgomery, 2004):

1. Identificación y exposición del problema.
2. Elección de los factores y niveles.
3. Selección de la variable de respuesta.
4. Elección de un diseño experimental.
5. Realización del experimento.
6. Análisis estadístico de los datos.
7. Conclusiones y recomendaciones.

Con base en estudios preliminares realizados en el Instituto de Minería el rango en el que se consideró para realizar un mejor proceso se encuentra entre 1200-1600 RPM. Por lo tanto, se emplearon 3 velocidades de agitación: 1200, 1400 y 1600 RPM. Esta variable está directamente relacionada a la cantidad de aire (y por lo tanto de burbujas) que entra en el reactor, debido al mecanismo de aireación de la celda. Cabe mencionar que la máquina de flotación con la que se cuenta en el laboratorio es analógica y tiene una legibilidad de 1:100. Por lo cual se eligieron números cerrados.

La concentración de espumante, Methyl Isobutyl Carbinol (MIBC), fue de 5, 15 y 30 ppm. La función de este reactivo es disminuir la tensión superficial del agua para que las burbujas que se generen en el seno del reactor sean estables, esféricas y uniformes. Los niveles se eligieron con base a estudios preliminares realizados en el Instituto de Minería donde se obtuvo un rango de 5-30 ppm, obteniendo una mejor estabilidad en las burbujas, cabe mencionar que operando por arriba de 30 ppm el proceso ya era inestable, ya que no se obtenían buenas recuperaciones. Ya que la cantidad que ocupa es mínima se manejará por medio de gotas de una jeringa (se realizaron 20 observaciones para poder obtener un promedio confiable de gota).

La dosificación de espumante se encuentra relacionada con la cantidad de agua con la que se trabajara.

$$ppm = \frac{mg}{litros}$$

Finalmente se emplearon 2 concentraciones de sólidos en el reactor, a razón de 1 y 3 % de sólidos (w/w). De acuerdo a los estudios preliminares con estos porcentajes fueron donde se obtuvo mayores recuperaciones

### 3.5 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la Tabla 6 se muestra el diseño de experimentos de esta investigación. Cabe mencionar que los parámetros que se mantuvieron constantes fueron T=30°C, pH=9.5, Agua=4.5 litros y Colector= 0.12g de Dodecilamina/Kg de material a separar. En el Anexo 2 se encuentran las condiciones de trabajo para cada experimento.

Tabla 6. Diseño de experimentos en el proceso de flotación. (Fuente: Tesista)

	1200 RPM		1400 RPM		1600 RPM	
Colector	1%	3%	1%	3%	1%	3%
5 ppm	1	2	3	4	5	6
15 ppm	7	8	9	10	11	12
30 ppm	13	14	15	16	17	18

Además, se realizaron dos replicas para cada experimento con la finalidad de tener un valor más confiable.

### 3.6 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para realizar cada uno de los experimentos se empleó el siguiente procedimiento:

- Primeramente se alimenta la celda con 4.5 L de agua (Figura 23). Se enciende la maquina Denver de acuerdo a las RPM que le corresponden al experimento. Posteriormente se modifica la temperatura a 30 °C con ayuda de una resistencia eléctrica.



Figura 23. Alimentación de agua. (Fuente: Tesista)

- Así mismo, se le agrega el colector Dodecilamina, previo cálculo de la cantidad, ya que ésta depende de la cantidad de material con que se trabajará (0.12g de Dodecilamina/Kg).
- Posteriormente se modifica el pH a 9.5 con ayuda de hidróxido de sodio. Después se le agrega el material a separar y el espumante (Figura 24) que corresponde al experimento.



Figura 24. Dosificación de espumante. (Fuente: Tesista)

- El tiempo de flotación se establece en 1 minuto (Figura 25), durante el cual, el material que se encuentra en la superficie es retirado, a este producto se le conoce como concentrado y al que se queda dentro de la celda se le conoce como colas.



Figura 25. Proceso de flotación. (Fuente: Tesista)

- Una vez terminado el proceso de flotación para cada muestra se obtienen dos productos (Figura 26), el concentrado (fibra de vidrio) y las colas (metales), estos últimos dos productos se secan en un horno a 60°C y posteriormente las muestras se pesan para realizar los cálculos correspondientes. Finalmente en cada muestra se determina la cantidad de fibra de vidrio y metal presente.



Figura 26. Material después de flotación. (Fuente: Tesista)

- Una vez obtenidos los porcentajes de cada muestra, se almacenan todas ellas y se registran para poder llevar un control de las mismas (Anexo 3 y 4).
- Se analizan los resultados de las muestras utilizando un paquete de software estadístico (MINITAB 14.0).

# **CAPÍTULO IV**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos durante el proceso de flotación. En la primera parte del capítulo se presenta la definición de recuperación del concentrado (fibra de vidrio) y posteriormente se realiza un análisis gráfico. Finalmente los resultados de los análisis de varianza para los tres factores: ppm, RPM y % de sólidos se analizaron mediante un paquete de software estadístico (MINITAB 14.0), en donde se utilizó un nivel de significancia de 0.05 (el nivel de significancia es el nivel de aceptación cuando la hipótesis sea falsa, lo conveniente es tener un valor pequeño, Montgomery 2004). En el análisis gráfico se define como efecto significativo del factor aquel que tenga una variación mayor al 5% entre las recuperaciones mayores de cada nivel.

En la última parte de este capítulo se encuentra una simulación de un circuito de flotación con la finalidad de recuperar el 100% de material alimentado.

#### 4.1 DEFINICIÓN DE RECUPERACIÓN

El proceso de separación por flotación se considera como selectivo, ya que mediante reactivos químicos se puede acentuar la hidrofobicidad de ciertas partículas para que se adhieran a las burbujas de aire y sean removidas en la corriente del concentrado.

La recuperación de cierto material, se define como la fracción o el porcentaje de éste que sale en la corriente del concentrado con respecto a lo que entra al sistema, de acuerdo a la Figura 27 y a la siguiente ecuación:

$$R_{FV} = \frac{FV_C}{FV_F} * 100$$

Considerando que:

$$FV_F = FV_C + FV_T$$

FV es la fibra de vidrio que está presente en la alimentación (F), en el concentrado (C) y en las colas (T), respectivamente.

Y de la misma forma para la recuperación del metal ( $R_M$ ):

$$R_M = \frac{M_T}{M_F} * 100$$

Considerando que:

$$M_F = M_C + M_T$$

M es el metal que está presente en la alimentación (F), en el concentrado (C) y en las colas (T), respectivamente.

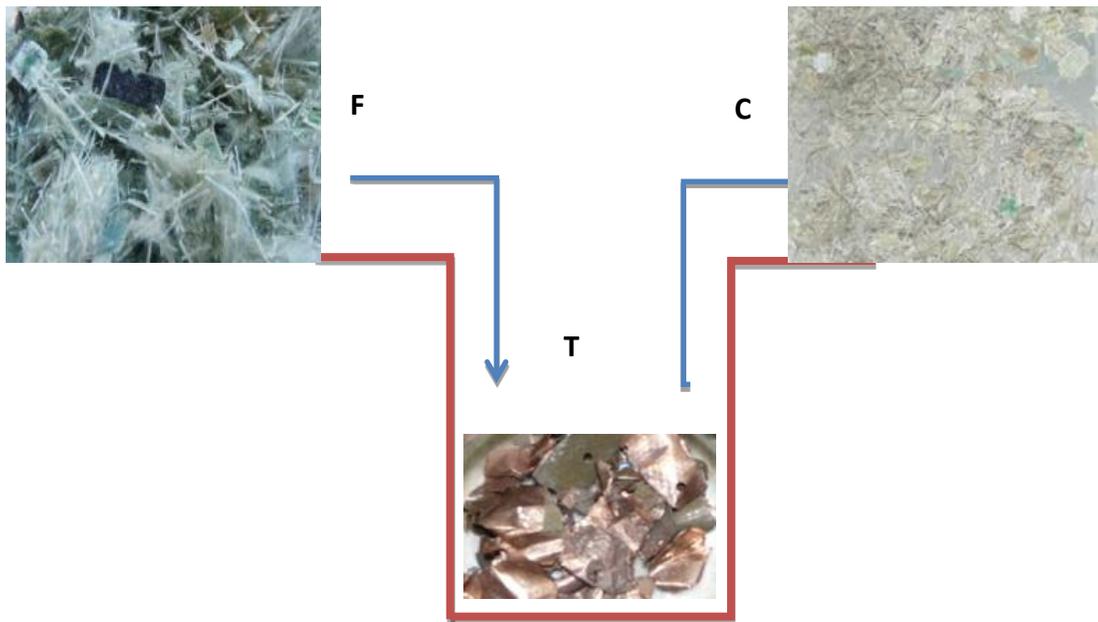


Figura 27. Balance de masa ( $F = C + T$ ). (Fuente: Tesista)

Es importante mencionar que la alimentación (F) tiene aproximadamente 70% de fibra de vidrio y el 30% metal. En condiciones ideales en el concentrado se recuperaría el 100% de fibra de vidrio y las colas de un 100% de metal.

#### 4.2 RECUPERACIÓN DE FIBRA VIDRIO ( $R_{FV}$ ) Y METAL

Los resultados obtenidos al calcular la recuperación de metal y fibra de vidrio se muestran en la Tabla 7. Es importante mencionar que a partir de estos resultados se realizará un primer análisis y posteriormente se realizará otro empleando la herramienta estadística Minitab.

Tabla 7. Porcentaje de recuperación de metal y fibra de vidrio. (Fuente: Tesista)

EXPERIMENTO	ESPUMANTE (PPM)	AGITACIÓN (RPM)	SÓLIDOS (%)	METAL (%)		FIBRA DE VIDRIO (%)	
				Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2
1	5	1200	1	86.74	88.83	69.63	66.84
2	5	1200	3	92.65	92.6	92.05	93.33
3	5	1400	1	88.38	90.4	85.36	82.23
4	5	1400	3	87.43	81.89	94.66	93.64
5	5	1600	1	78.57	83.53	88.16	89.04
6	5	1600	3	88.51	87.83	92.71	93.00
7	15	1200	1	79.77	88.98	82.37	84.06
8	15	1200	3	89.48	89.16	94.04	93.94
9	15	1400	1	92.76	94.35	84.17	86.69
10	15	1400	3	87.39	90.83	93.94	93.55
11	15	1600	1	94.89	95.86	75.79	78.96
12	15	1600	3	75.48	84.11	97.11	96.46
13	30	1200	1	94.60	94.55	86.31	90.20
14	30	1200	3	88.46	89.42	94.35	94.01
15	30	1400	1	96.34	97.37	79.05	74.15
16	30	1400	3	78.44	80.72	94.06	94.28
17	30	1600	1	96.81	96.25	72.09	77.33
18	30	1600	3	87.79	89.67	93.79	93.82

#### 4.2.1 Análisis estadístico

Ahora bien es importante analizar los resultados desde el punto de vista estadístico. Para esto se empleó un análisis de varianza (ANOVA).

La metodología para llevar a cabo un ANOVA se muestra en el Anexo 5. El análisis se realizó utilizando un  $\alpha=0.05$ , esto quiere decir que el nivel de confianza de nuestro modelo es del 95%.

Tabla 8. ANOVA para el porcentaje de recuperación de fibra de vidrio. Diseño de 3 factores con 2 réplicas: espumante, agitación y sólidos con 3, 3 y 2 niveles respectivamente para tener un total de 36 corridas. (Fuente: Tesista)

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA RECUPERACIÓN DE FIBRA DE VIDRIO						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Espumante (ppm)	2	20.45	20.45	10.23	3.42	0.055
Agitación (rpm)	2	8.94	8.94	4.47	1.49	0.251
Sólidos (%)	1	1604.14	1604.14	1604.14	536.09	0.000
Espumante (ppm)*Agitación (rpm)	4	356.62	356.62	89.16	29.80	0.000
Espumante (ppm)*Sólidos (%)	2	3.27	3.27	1.64	0.55	0.588
Agitación (rpm)*Sólidos (%)	2	7.69	7.69	3.85	1.29	0.301
Espumante (ppm)*Agitación (rpm)* Sólidos (%)	4	378.69	378.69	94.67	31.64	0.000
Error	18	53.86	53.86	2.99		
Total	35	2433.68				

Siguiendo la metodología del ANOVA (Anexo 5 y 6) los datos quedaron de la siguiente manera:

A: Factor Espumante con  $a=3$

B: Factor Agitación con  $b=3$

C: Factor Sólidos con  $c=2$

$$n = 2$$

**Análisis de varianza para el factor espumante (ppm).**

Las hipótesis quedan de la siguiente manera de acuerdo al Anexo 5:

$$H_0: \tau_i = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0$$

Ahora se compara  $F_0$  siguiendo la metodología del ANOVA (Anexo 5):

$$F_0 > F \text{ Tablas}$$

Calculando F Tablas:

$$F_{\alpha, v_1, v_2} = F_{\alpha, (a-1), abc(n-1)}$$

$$F_{0.05, 2, 18} = 3.55$$

$3.42 > 3.55$ ? No, por lo tanto se acepta la  $H_0$ . Por lo que se concluye que las ppm del espumante no tienen efecto sobre la recuperación de fibra.

Los mismo se realiza para los siguientes dos factores y sus interacciones, y finalmente en la tabla 9 se resumen los resultados.

Tabla 9. Efecto significativo (si  $F_0 > F_{Tablas}$ ) de los factores y sus interacciones. (Fuente: Tesista)

FACTOR	F0	F Tablas	EFEECTO
<b>Espumante (ppm)</b>	3.42	3.55	NO
<b>Agitación (rpm)</b>	1.49	3.55	NO
<b>Sólidos (%)</b>	536.09	4.41	SI
<b>Espumante (ppm)*Agitación (rpm)</b>	29.80	2.93	SI
<b>Espumante (ppm)*Solidos (%)</b>	0.55	3.55	NO
<b>Agitación (rpm)*Solidos (%)</b>	1.29	3.55	NO
<b>Espumante (ppm)*Agitación (rpm)* Sólidos (%)</b>	31.64	2.93	SI

#### 4.2.2 Determinación de los parámetros adecuados para la recuperación de fibra de vidrio.

La Figura 37 nos muestra las condiciones recomendables para operar el proceso de flotación para el porcentaje de recuperación de fibra de vidrio. Aunque el espumante se observa que es un factor no determinante porque la variación de las mayores recuperaciones no es mayor del 5%, se recomienda trabajar con una dosis de 15 ppm obteniendo una recuperación promedio del 88.2% de la fibra de vidrio alimentada, la agitación es otro factor que no es determinante (<5%), pero sin embargo se recomienda operar bajo 1400 rpm ya que en promedio es cuando el proceso tiene una mejor recuperación (88%) en comparación con la de 1200 y 1600 RPM, cabe mencionar que no son determinantes debido a que la variación entre los niveles no es mayor al 5%, sin embargo se recomienda operar en los niveles donde hubo mayor recuperación de fibra de vidrio, y finalmente una cantidad de sólidos del 3% del volumen para recuperar un promedio de 94% de fibra de vidrio ya que al 1% la recuperación promedio es del 80% aproximadamente. El operar bajo estas condiciones es una manera recomendable, ya que es donde existe menor variación de los factores. Al operar bajo la combinación de estas condiciones obtendremos una recuperación del 93.74% de fibra de vidrio y del 89.11% de metal. Finalmente se concluye que se optimizó el proceso ya que se determinaron los parámetros adecuados para operar dicho proceso.

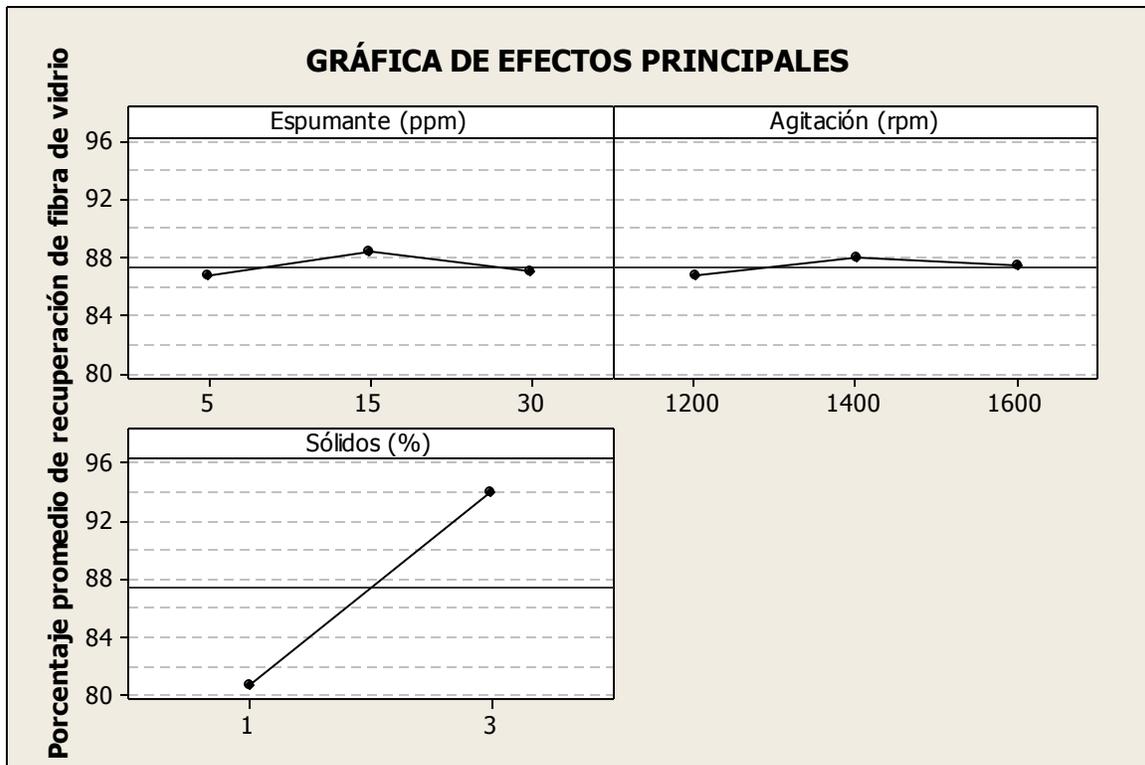


Figura 28. Condiciones recomendables para la recuperación de fibra de vidrio.

(Fuente: Tesista)

La reproducibilidad de los experimentos realizados en este trabajo es aceptable, ya que tuvieron una desviación estándar de 1.72

### 4.2.3 Análisis gráfico

#### 4.2.3.1 Efecto del contenido de sólidos

La gráfica muestra el efecto que tiene el porcentaje del contenido de sólidos y la dosificación del espumante (ppm) sobre la recuperación de fibra (Figura 29). Se observa que el porcentaje de sólidos es un factor determinante para la recuperación de la fibra de vidrio porque se obtiene el 97% de recuperación a 1600 rpm con una concentración del espumante de 15 ppm al operar con un 3% de sólidos (Figura 29 a), mientras que operar al 1% se obtienen recuperaciones por debajo del 89% (Figura 29 b) y con mucha variación.

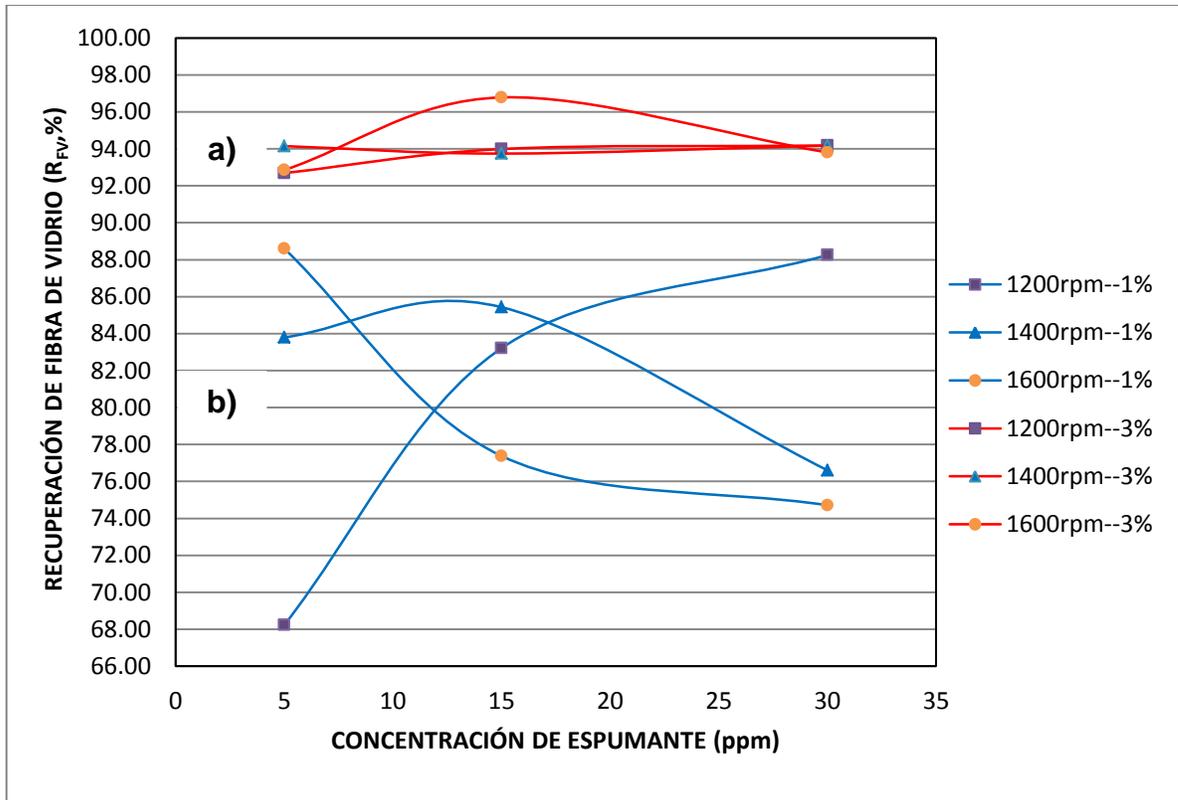


Figura 29. Efecto que tiene la concentración de espumante (ppm) sobre la recuperación de fibra de vidrio a diferentes velocidades de agitación (RPM): a) 3% y b) 1 % de sólidos. (Fuente: Tesista)

## 4.2.3.2 Efecto del concentrado de espumante y agitación

Con el 3% de sólidos se puede observar (Figura 29a) que la variación de la recuperación de fibra de vidrio entre ellos es mínima, es decir, la concentración de espumante y la agitación, no tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta ( $< 5\%$ ).

Sin embargo, en la Figura 30 se puede apreciar un punto, el cual tiene las siguientes condiciones de operación: 15 ppm de espumante, 1600 rpm y 3% de sólidos, lo anterior puede tomarse como la combinación donde se puede recuperar la mayor cantidad de fibra de vidrio en la corriente del concentrado. Así también, la Figura 29 nos muestra que operar a 1200 RPM la recuperación va aumentando conforme aumenta la concentración de espumante obteniendo como máximo el 94% de recuperación. A diferencia cuando se opera a 1400 RPM se mantiene en aproximadamente el 94%. Cuando se opera a 1600 RPM la recuperación obtiene su máximo a 15 ppm pero disminuye a 30 ppm.

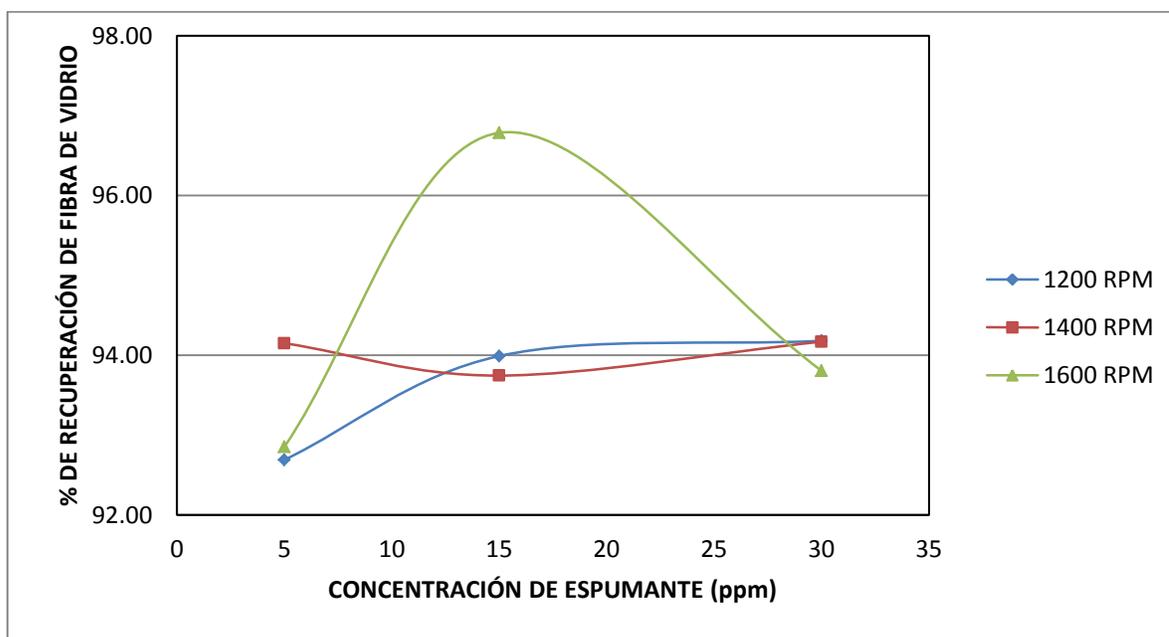


Figura 30. Efecto que tiene la agitación a diferentes concentraciones de espumante al 3%. (Fuente: Tesista)

El material metálico encontrado en el concentrado, consiste de finos hilos (en su mayoría de cobre) enredados en la fibra de vidrio. Estos hilos son arrastrados mecánicamente al concentrado y removidos en la superficie de la espuma. En la Figura 31 se muestra uno de los productos de la corriente del concentrado (experimento 10) en donde, se puede apreciar la constitución de la fibra de vidrio (79.57g equivalentes al 93.74% de la fibra alimentada) y el metal (3.82g equivalentes al 10.89% del metal alimentado) que llevaba consigo.



Figura 31.- Fibra de vidrio y metal que conforman la corriente del concentrado de la prueba 10. (Fuente: Tesista)

La corriente de colas se ve directamente afectada por el desempeño de la flotación de fibra de vidrio, ya que la fibra que no se logre flotar se irá directamente a dicha corriente. Esto se puede apreciar en la Figura 32, en donde se muestran los productos obtenidos de la corriente de colas. Como se puede observar, la

cantidad de fibra de vidrio para este experimento (experimento 10), no es considerable ya que 5.56 g corresponden al 6.55% de la fibra alimentada. Es necesario obtener un producto lo más libre de fibra de vidrio para que no se interfiera en procesos subsecuentes. Esto se logra mediante un segundo banco de flotación en donde se retire la mayor cantidad de fibra posible. Un ejemplo donde se describe la simulación de circuitos de flotación para este experimento se presenta en la sección 4.2.2.



Figura 32.- Fibra de vidrio y metal que conforman la corriente de colas de la prueba 10. (Fuente: Tesista)

A diferencia del proceso de flotación convencional, en donde hay una gran cantidad de tipos de partículas debido a la naturaleza del mineral, el material obtenido del proceso SM solamente provee al proceso de flotación de dos tipos de material: fibra de vidrio y metal. Lo anterior da una ventaja, ya que se pueden alcanzar una separación completa, en donde el concentrado sea 100% fibra de vidrio y las colas sean 100% metal.

#### 4.2.4 Simulación de un circuito de flotación

Como se mostró en la sección anterior, la fibra de vidrio recuperada en la corriente del concentrado contiene cierta cantidad de metal, en promedio el 7% de la masa total. Es importante mencionar que, las pruebas de laboratorio necesarias para determinar las condiciones de operación se realizan en un solo paso, es decir, con una sola celda de flotación. En la industria, los circuitos de flotación consisten en una serie de bancos interconectados para lograr la remoción de la mayor cantidad posible del material de interés. El método tradicional para el análisis de los circuitos de flotación consiste en proporcionar un balance metalúrgico que indica el rendimiento de cada sección (Kelly y Spottiswood, 1990). La cantidad que flota en cada etapa puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Masa liberada} = (1 - (1 - p)^n)M$$

Dónde:

p= porcentaje de liberación en cualquier etapa.

n= número de etapas.

M= masa de la pulpa inicial.

En la Figura 33 se muestra una representación esquemática de un circuito de flotación para 1 ton de material, teniendo como base los resultados del experimento 10. El objetivo de este análisis es obtener una recuperación de fibra de vidrio y metal cercano al 100%. Como se mencionó anteriormente, el experimento 10 es el que mostró mejor desempeño durante esta investigación, por lo cual se considera la simulación funciona de acuerdo a sus parámetros.

Se propone un circuito de tres bancos de flotación. La alimentación del material al proceso entra en el Banco 1, donde se efectúa la flotación y se obtienen dos productos: el concentrado que es la alimentación del Banco 2 y las colas forman parte de la alimentación del Banco 3. La recuperación de fibra de vidrio en el concentrado para el Banco 1 es de 93.74% (663.05 kg de fibra de

vidrio y 31.87 kg de metal). La cantidad de metal que contiene este concentrado, hace necesario el empleo de un segundo banco para tener la oportunidad de retirar la mayor cantidad posible de éste.

En el banco 2 se obtienen nuevamente dos productos; el concentrado (que sale del sistema) y las colas. En el concentrado se obtienen 660.45 kg de fibra de vidrio y 3.47 kg de metal. En las colas se obtienen 2.60 kg de fibra de vidrio y 28.40 kg de metal, los cuales son enviados a la alimentación del Banco 3.

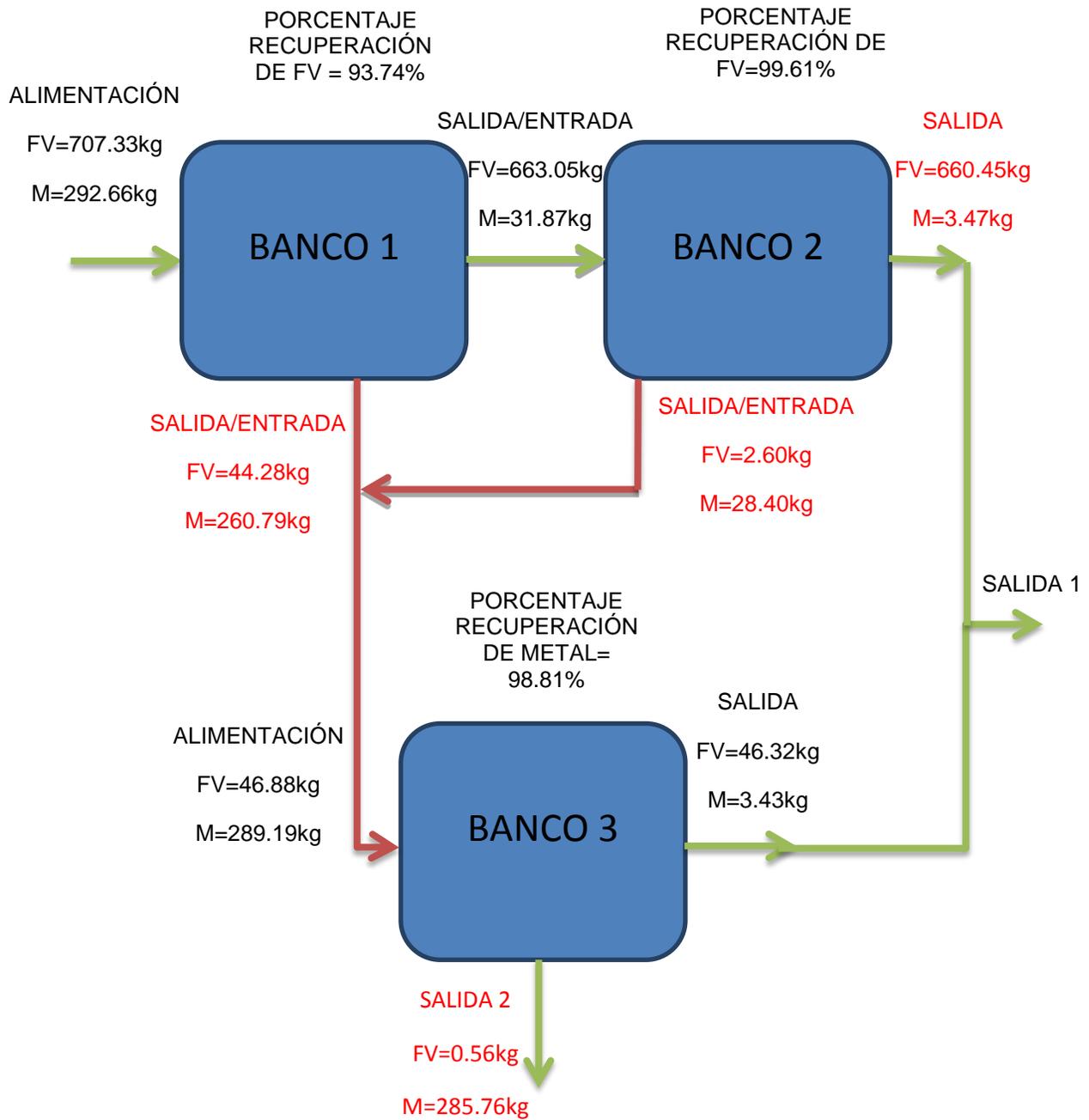


Figura 33. Simulación de circuito de flotación. (Fuente: Tesista)

Como se mencionó anteriormente, las colas del Banco 1 y 2 se juntan para formar la alimentación del Banco 3. Una vez concluido el proceso de flotación en la Tabla 10 se muestran los resultados, se recuperan 46.32 kg de fibra de vidrio y 3.43 kg de metal en la corriente del concentrado. Y para la corriente de colas se obtiene 0.56 kg de fibra de vidrio con 285.76 kg de metal.

Tabla 10. Resultados finales del circuito de flotación (Fuente: Tesista)

	ALIMENTACIÓN INICIAL (kg)	SALIDA 1 (kg)	SALIDA 2 (kg)	RECUPERACIÓN (%)
Fibra de vidrio	707.36	706.77	0.56	99.91
Metal	292.66	6.90	285.76	97.64

En el circuito de flotación propuesto, se obtiene 99.91 y 97.64% de recuperación en fibra de vidrio y de metal, lo cual da como resultados dos productos, el de la Salida 1 y Salida 2. Cabe recordar que la alimentación del circuito contiene 70.73% de fibra de vidrio y 29.27% de metal. En la Figura 34 se muestra esquemáticamente los productos obtenidos del circuito de flotación. El producto de la Salida 1 contiene 99.03 y 0.97% de fibra de vidrio y metal, respectivamente. Y el de la Salida 2, contiene 0.20% de fibra de vidrio y 99.80% de metal.

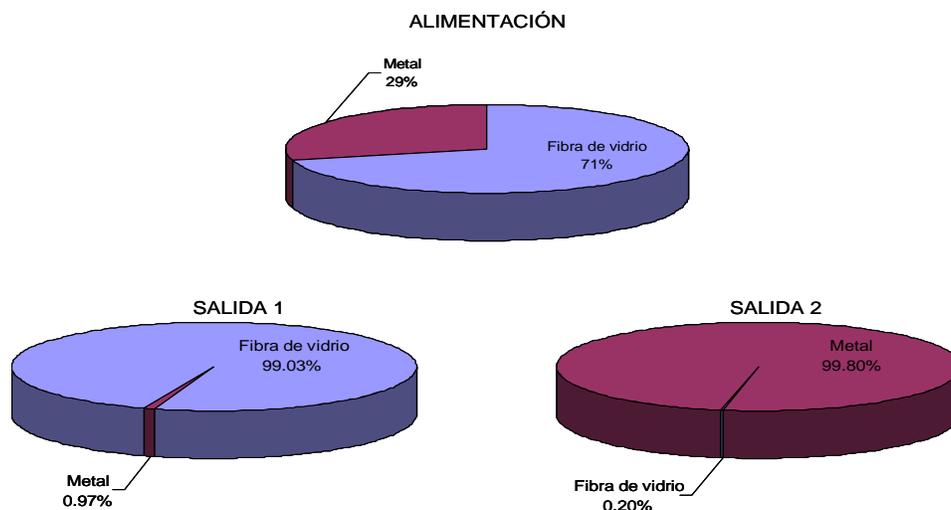


Figura 34. Proporciones de fibra de vidrio y metal presentes en la alimentación y en la Salida 1 y Salida 2. (Fuente: Tesista)

Si se desea disminuir la presencia del elemento minoritario en cada salida, se requiere de incrementar la cantidad de bancos en el circuito. En todo caso, se recomienda realizar una evaluación económica para ver la factibilidad de dicha acción.

# **CAPÍTULO V**

## **CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS**

## CONCLUSIONES

1. Con la flotación se pueden separar los productos de mayor interés económico que se obtienen del proceso SM: fibra de vidrio y metal.
2. Se optimizó el proceso de flotación al obtener las condiciones adecuadas de operación las cuales corresponden a: 15 ppm de espumante, 1400 RPM y 3% de sólidos, donde se logra la máxima recuperación 93.74% de la fibra de vidrio con la que se alimenta el sistema. Mientras que en la corriente de colas se obtiene el 89.11% del metal. Cabe mencionar que estos parámetros obtenidos del ANOVA coinciden con el análisis gráfico a excepción de la agitación ya que en el ANOVA hace un análisis de promedios de todos los experimentos, y en el análisis gráfico solo es del experimento con mayor porcentaje de recuperación, por tal motivo es más confiable operar bajo las condiciones obtenidas del ANOVA
3. Se comprobó que de las tres variables de operación en el proceso de flotación la concentración de espumante y la velocidad de agitación no tienen una influencia considerable en la recuperación de fibra de vidrio, mientras que la concentración de sólidos es determinante en la optimización del proceso ( $F_0 > F_{Tablas}$ ). El ANOVA corrobora estos resultados.
4. La simulación del circuito es una propuesta para poder procesar 1 tonelada de material, esta simulación permite dar una panorámica más general para estudios posteriores en donde se pretenda diseñar una planta piloto, cabe señalar que los datos utilizados fueron obtenidos mediante experimentos reales que se realizaron en esta investigación.

## PERSPECTIVAS

1. En este trabajo se determinaron las condiciones ideales para operar el proceso de flotación en el reciclaje de PCB, dejando las bases para que en trabajos futuros se proponga el diseño de una planta piloto.
2. Estudios con otros colectores y espumantes están en curso con el objetivo de tener un estudio más completo.
3. Este trabajo es de gran interés ya que los materiales fibra de vidrio y placa metálica, recuperados se pueden emplear:

Placa metálica, obtener los metales mediante hidrometalurgia, como Au, Ag, Cu, Pb, Sn, entre otros para reusarlos en la manufactura de componentes electrónicos.

Fibra de vidrio, se puede volver a reusar fundiéndola para elaborar hilos o combinándola con los polímeros de las carcasas para elaborar materiales tipo compósitos, que tengan determinadas propiedades; mecánicas, térmicas, etc., para su empleo en la manufactura de componentes electrónicos.

4. Realizar un proyecto de inversión del proceso con la finalidad de analizar si el proyecto es viable.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1

PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS METALES Y PLÁSTICOS PRESENTES EN  
LOS DESECHOS ELECTRÓNICOS

Tabla A1.1 Propiedades físicas de los metales y plásticos presentes en los desechos electrónicos (Cui y Forssberg, 2003; Zhang y Forssberg, 1998; Goosey y Kellner, 2002; Hammond, 2005; Barbalace, 2010; Cheremisinoff, 1995).

Material	Gravedad específica (g/cm <sup>3</sup> )	Conductividad eléctrica $\sigma$ (10 <sup>6</sup> m <sup>-1</sup> Ω <sup>-1</sup> )	Susceptibilidad magnética X (10 <sup>6</sup> cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )
<i>Metales</i>			
Oro (Au)	19.32	41.0	Diamagnético (-28)
Paladio (Pd)	12.02	9.50	Paramagnético (+540)
Plomo (Pb)	11.40	5.00	Diamagnético (-23)
Plata (Ag)	10.49	68.0	Diamagnético (-19.5)
Cobre (Cu)	8.93	59.0	Diamagnético (-5.46)
Cobalto (Co)	8.90	17.2	Ferromagnético
Níquel (Ni)	8.90	12.50	Ferromagnético
Hierro (Fe)	7.86	9.33	Ferromagnético
Estaño (Sn)	7.3	9.17	Paramagnético
Cromo (Cr)	7.19	7.74	Paramagnético(+167)
Aluminio (Al)	2.70	37.7	Paramagnético(+16.5)
<b>Resistividad volumétrica (Ωm)</b>			
<i>Plásticos</i>			
Fibra de vidrio reforzada (FRP)	1.80-2.00	10 <sup>12</sup>	Diamagnético
Poliéster (PET y PBT)	1.31-1.39	1-1.4x10 <sup>13</sup>	
Cloruro de	1.16-1.38	10 <sup>9</sup> -2x10 <sup>12</sup>	

polivinilo (PVC)		
Policarbonato (PC)	1.22	$8.2 \times 10^{14}$
Nylon poliamida (PA)	1.14	$10^{12}$
Acrilonitrilo- butadieno- estireno (ABS)	1.04	$10^{14}$
Poliestireno (PS)	1.04	$10^{14}$
Polietileno (PE)	0.91-0.96	$10^{14}$
Polipropileno (PP)	0.90	$10^{15}$
Elastómeros (neopreno, SBR, silicón, etc.)	0.85-1.25	$10^9-10^{15}$

## ANEXO 2

## CONDICIONES DE TRABAJO PARA CADA EXPERIMENTO

Tabla A2.1 Condiciones de trabajo para cada experimento. (Fuente: Tesista)

Condiciones de trabajo							
N° de prueba	Sólidos (g)	Agua (L)	Temperatura (°C)	pH	Velocidad de agitación (RPM)	Colector (mg)	Espumante (ppm)
1	45	4.5	30	9.5	1200	5.4	5
2	120	4.0	30	9.5	1200	14.4	5
3	45	4.5	30	9.5	1400	5.4	5
4	120	4.0	30	9.5	1400	14.4	5
5	45	4.5	30	9.5	1600	5.4	5
6	120	4.0	30	9.5	1600	14.4	5
7	45	4.5	30	9.5	1200	5.4	15
8	120	4.0	30	9.5	1200	14.4	15
9	45	4.5	30	9.5	1400	5.4	15
10	120	4.0	30	9.5	1400	14.4	15
11	45	4.5	30	9.5	1600	5.4	15
12	120	4.0	30	9.5	1600	14.4	15
13	45	4.5	30	9.5	1200	5.4	30
14	120	4.0	30	9.5	1200	14.4	30
15	45	4.5	30	9.5	1400	5.4	30
16	120	4.0	30	9.5	1400	14.4	30
17	45	4.5	30	9.5	1600	5.4	30
18	120	4.0	30	9.5	1600	14.4	30

**ANEXO 3**

HOJAS DE CÁLCULO PARA LA EXPERIMENTACIÓN: RÉPLICA 1

Tabla A3.1 Hoja de cálculo: Réplica 1 (Fuente: Tesista)

N° de prueba	Recuperación (Réplica 1)				
		Colas (g)	Colas (%)	Concentrado (g)	Concentrado (%)
1	<b>Total</b>	<b>20.00</b>	<b>44.44</b>	<b>25.00</b>	<b>55.56</b>
	Metal	9.75	48.73	1.49	5.96
	Fibra de vidrio	10.25	51.27	23.51	94.04
2	<b>Total</b>	<b>23.30</b>	<b>51.78</b>	<b>21.70</b>	<b>48.22</b>
	Metal	20.03	85.97	2.63	12.14
	Fibra de vidrio	3.27	14.03	19.06	87.86
3	<b>Total</b>	<b>15.50</b>	<b>34.44</b>	<b>29.50</b>	<b>65.56</b>
	Metal	11.98	77.27	3.27	11.07
	Fibra de vidrio	3.52	22.73	26.24	88.93
4	<b>Total</b>	<b>18.00</b>	<b>40.00</b>	<b>27.00</b>	<b>60.00</b>
	Metal	12.92	71.79	3.28	12.14
	Fibra de vidrio	5.08	28.21	23.72	87.86
5	<b>Total</b>	<b>20.97</b>	<b>46.60</b>	<b>24.03</b>	<b>53.40</b>
	Metal	16.70	79.62	1.30	5.42
	Fibra de vidrio	4.27	20.38	22.73	94.58
6	<b>Total</b>	<b>25.60</b>	<b>56.89</b>	<b>19.40</b>	<b>43.11</b>
	Metal	19.74	77.12	1.06	5.48
	Fibra de vidrio	5.86	22.88	18.34	94.52
7	<b>Total</b>	<b>27.50</b>	<b>61.11</b>	<b>17.50</b>	<b>38.89</b>
	Metal	24.95	90.73	1.42	8.14
	Fibra de vidrio	2.55	9.27	16.08	91.86
8	<b>Total</b>	<b>32.10</b>	<b>71.33</b>	<b>12.90</b>	<b>28.67</b>
	Metal	28.97	90.26	1.10	8.54
	Fibra de vidrio	3.13	9.74	11.80	91.46
9	<b>Total</b>	<b>27.00</b>	<b>60.00</b>	<b>18.00</b>	<b>40.00</b>
	Metal	20.29	75.15	0.67	3.71
	Fibra de vidrio	6.71	24.85	17.33	96.29

N° de prueba	Recuperación (Réplica 1)				
		Colas (g)	Colas (%)	Concentrado (g)	Concentrado (%)
10	<b>Total</b>	<b>39.50</b>	<b>32.92</b>	<b>80.50</b>	<b>67.08</b>
	Metal	32.78	82.98	2.60	3.23
	Fibra de vidrio	6.72	17.02	77.90	96.77
11	<b>Total</b>	<b>34.50</b>	<b>28.75</b>	<b>85.50</b>	<b>71.25</b>
	Metal	29.92	86.72	4.30	5.03
	Fibra de vidrio	4.58	13.28	81.20	94.97
12	<b>Total</b>	<b>37.80</b>	<b>31.50</b>	<b>82.20</b>	<b>68.50</b>
	Metal	31.66	83.75	4.11	5.00
	Fibra de vidrio	6.14	16.25	78.09	95.00
13	<b>Total</b>	<b>34.60</b>	<b>28.83</b>	<b>85.40</b>	<b>71.17</b>
	Metal	29.41	85.00	3.46	4.05
	Fibra de vidrio	5.19	15.00	81.95	95.95
14	<b>Total</b>	<b>38.60</b>	<b>32.17</b>	<b>81.40</b>	<b>67.83</b>
	Metal	33.66	87.20	4.86	5.97
	Fibra de vidrio	4.94	12.80	76.54	94.03
15	<b>Total</b>	<b>25.40</b>	<b>21.17</b>	<b>94.60</b>	<b>78.83</b>
	Metal	22.81	89.77	7.41	7.83
	Fibra de vidrio	2.60	10.23	87.19	92.17
16	<b>Total</b>	<b>45.90</b>	<b>38.25</b>	<b>74.10</b>	<b>61.75</b>
	Metal	41.79	91.04	5.45	7.36
	Fibra de vidrio	4.11	8.96	68.65	92.64
17	<b>Total</b>	<b>32.60</b>	<b>27.17</b>	<b>87.40</b>	<b>72.83</b>
	Metal	27.56	84.54	7.58	8.67
	Fibra de vidrio	5.04	15.46	79.82	91.33
18	<b>Total</b>	<b>38.10</b>	<b>31.75</b>	<b>81.90</b>	<b>68.25</b>
	Metal	32.98	86.56	4.59	5.60
	Fibra de vidrio	5.12	13.44	77.31	94.40

## ANEXO 4

## HOJAS DE CÁLCULO PARA LA EXPERIMENTACIÓN: RÉPLICA 2

Tabla A4.1 Hoja de cálculo: Réplica 2 (Fuente: Tesista)

N° de prueba	Recuperación (Réplica 2)				
		Colas (g)	Colas (%)	Concentrado (g)	Concentrado (%)
1	<b>Total</b>	<b>22.09</b>	<b>49.09</b>	<b>22.91</b>	<b>50.91</b>
	Metal	11.44	51.78	1.44	6.28
	Fibra de vidrio	10.65	48.22	21.47	93.72
2	<b>Total</b>	<b>24.43</b>	<b>54.28</b>	<b>20.57</b>	<b>45.72</b>
	Metal	20.72	84.84	2.20	10.70
	Fibra de vidrio	3.70	15.16	18.37	89.30
3	<b>Total</b>	<b>17.25</b>	<b>38.33</b>	<b>27.75</b>	<b>61.67</b>
	Metal	14.18	82.19	2.79	10.07
	Fibra de vidrio	3.07	17.81	24.96	89.93
4	<b>Total</b>	<b>19.21</b>	<b>42.69</b>	<b>25.79</b>	<b>57.31</b>
	Metal	14.67	76.34	1.82	7.04
	Fibra de vidrio	4.55	23.66	23.97	92.96
5	<b>Total</b>	<b>19.52</b>	<b>43.38</b>	<b>25.48</b>	<b>56.62</b>
	Metal	15.75	80.70	0.94	3.70
	Fibra de vidrio	3.77	19.30	24.54	96.30
6	<b>Total</b>	<b>24.87</b>	<b>55.27</b>	<b>20.13</b>	<b>44.73</b>
	Metal	19.74	79.35	0.85	4.23
	Fibra de vidrio	5.14	20.65	19.28	95.77
7	<b>Total</b>	<b>24.51</b>	<b>54.47</b>	<b>20.49</b>	<b>45.53</b>
	Metal	22.43	91.49	1.29	6.31
	Fibra de vidrio	2.09	8.51	19.20	93.69
8	<b>Total</b>	<b>34.56</b>	<b>76.80</b>	<b>10.44</b>	<b>23.20</b>
	Metal	31.21	90.32	0.84	8.08
	Fibra de vidrio	3.35	9.68	9.60	91.92
9	<b>Total</b>	<b>25.54</b>	<b>56.76</b>	<b>19.46</b>	<b>43.24</b>
	Metal	20.07	78.56	0.78	4.02
	Fibra de vidrio	5.48	21.44	18.68	95.98

N° de prueba	Recuperación (Réplica 2)				
		Colas (g)	Colas (%)	Concentrado (g)	Concentrado (%)
10	<b>Total</b>	<b>37.56</b>	<b>31.30</b>	<b>82.44</b>	<b>68.70</b>
	Metal	31.85	84.81	2.55	3.09
	Fibra de vidrio	5.71	15.19	79.89	96.91
11	<b>Total</b>	<b>34.21</b>	<b>28.51</b>	<b>85.79</b>	<b>71.49</b>
	Metal	28.82	84.24	6.37	7.43
	Fibra de vidrio	5.39	15.76	79.41	92.57
12	<b>Total</b>	<b>35.24</b>	<b>29.37</b>	<b>84.76</b>	<b>70.63</b>
	Metal	29.17	82.77	4.04	4.77
	Fibra de vidrio	6.07	17.23	80.71	95.23
13	<b>Total</b>	<b>32.65</b>	<b>27.21</b>	<b>87.35</b>	<b>72.79</b>
	Metal	27.23	83.40	3.31	3.79
	Fibra de vidrio	5.42	16.60	84.04	96.21
14	<b>Total</b>	<b>36.98</b>	<b>30.82</b>	<b>83.02</b>	<b>69.18</b>
	Metal	31.48	85.11	3.18	3.83
	Fibra de vidrio	5.51	14.89	79.84	96.17
15	<b>Total</b>	<b>30.28</b>	<b>25.23</b>	<b>89.72</b>	<b>74.77</b>
	Metal	27.17	89.74	5.13	5.72
	Fibra de vidrio	3.11	10.26	84.59	94.28
16	<b>Total</b>	<b>44.64</b>	<b>37.20</b>	<b>75.36</b>	<b>62.80</b>
	Metal	40.14	89.92	4.75	6.30
	Fibra de vidrio	4.50	10.08	70.61	93.70
17	<b>Total</b>	<b>34.56</b>	<b>28.80</b>	<b>85.44</b>	<b>71.20</b>
	Metal	29.80	86.24	7.12	8.33
	Fibra de vidrio	4.76	13.76	78.32	91.67
18	<b>Total</b>	<b>40.21</b>	<b>33.51</b>	<b>79.79</b>	<b>66.49</b>
	Metal	35.25	87.66	4.06	5.09
	Fibra de vidrio	4.96	12.34	75.73	94.91

## ANEXO 5

### ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA).

El análisis de varianza (ANOVA) en forma general sirve para probar hipótesis a través de analizar la variabilidad (varianza de datos). Permite realizar un análisis del proceso para determinar los factores fundamentales en el mismo, así como visualizar la magnitud en la que afecta cada uno de ellos a la variable de respuesta. También nos ayuda a determinar las condiciones óptimas para operar el proceso manejando niveles de confianza desde el 75% hasta el 99%. El análisis de varianza es una herramienta muy eficiente para controlar procesos, algunos datos importantes que se obtienen son la desviación estándar, la cual, permite ver la variación entre los datos y el coeficiente de correlación  $R^2$ , que nos indica el nivel de confiabilidad del modelo.

En un diseño factorial general puede haber 3 o más factores de tal manera que hay **a** niveles del factor A, **b** niveles del factor B, **c** niveles del factor C, etc., dispuestos en un experimento factorial. En general habrá  $abc \dots n$  observaciones totales si se hacen **n** réplicas del experimento completo.

El modelo de análisis de varianza de tres factores es:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Dónde:

$$i = 1, 2, \dots, a$$

$$j = 1, 2, \dots, b$$

$$k = 1, 2, \dots, c$$

$$l = 1, 2, \dots, n$$

$\mu$ : Efecto promedio global

$\tau_i$ : efecto del nivel i-ésimo del factor A

$\beta_j$ : efecto del nivel j-ésimo del factor B

$\gamma_k$ : efecto del nivel k-ésimo del factor C

$(\tau\beta)_{ij}$ : efecto de la interacción entre el factor A y B

$(\tau\gamma)_{ik}$ : efecto de la interacción entre el factor A y C

$(\beta\gamma)_{jk}$ : efecto de la interacción entre el factor B y C

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ : efecto de la interacción entre el factor A, B y C

$\varepsilon_{ijkl}$ : Componente del error aleatorio

$n$ : Número de réplicas

Ahora bien, el interés se encuentra en probar la hipótesis para ver si los factores o sus interacciones, tienen efecto significativo sobre la variable de respuesta.

Por ejemplo para el factor A las hipótesis quedan de la siguiente manera:

$$H_0: \tau_i = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0$$

Donde  $H_0$  indica que este factor no tiene efecto sobre la variable de respuesta. Y  $H_1$  indica que este factor tiene efecto sobre la variable de respuesta.

Para determinar cuál de las dos hipótesis se favorece es necesario hacer una comparación entre  $F_0$  y  $F$  de tablas. Las tablas del valor de  $F$  con un nivel de confianza del 95% se encuentra en el Anexo 2 (Tabla A2.1).

Finalmente la conclusión de elegir la hipótesis adecuada se resume en la siguiente ecuación:

$$F_0 > F \text{ Tablas}$$

Donde

$$F \text{ Tablas} = F_{\alpha, v_1, v_2}$$

Y

$$F_{\alpha, v_1, v_2} = F_{\alpha, (a-1), abc(n-1)}$$

Si  $F_0 > F \text{ Tablas}$  entonces se concluye que el factor tiene efecto significativo sobre la variable de respuesta. En caso contrario la variable no tiene algún efecto sobre la variable de respuesta y por lo tanto los niveles de este factor no son relevantes en el proceso. Cabe mencionar en caso dado que se cumpla la hipótesis  $H_1$ , mientras más grande sea la  $F_0$ , quiere decir que más significativo es el efecto de esta variable sobre la variable de respuesta.

**ANEXO 6**

**PUNTOS PORCENTUALES DE LA DISTRIBUCIÓN F**

Tabla A6.1 Puntos porcentuales de la distribución  $F_{0.05, v1, v2}$ .

		Grados de libertad del numerador ( $v1$ )									
$v1$	$v2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Grados de libertad del numerador ( $v2$ )	1	161.40	199.50	215.70	224.60	230.20	234.00	236.80	238.90	240.50	241.90
	2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40
	3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35
	30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16
	40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08

Montgomery, D. C. 2004. Diseño y análisis de experimentos. 2a ed. ISBN: 968-18-6156-6, Pp. 649.

# **BIBLIOGRAFÍA**

- Akcil, A., Yazici, E.Y., Deveci, H. 2009. E-wastes: mines of future. Waste management. Recycling and Environmental Technologies Magazine. Vol. 10, pp. 65–73.
- Antrekowitsch, H., Potesser, M., Spruzina, W., Prior, F. 2006. Metallurgical recycling of electronic scrap. Extraction and Processing Division Congress. ISBN: 9781604236545, pp. 899–908.
- Babu, B.R., Parande, A.K., Basha, C.A. 2007. Electrical and electronic waste: a global environmental problem. Waste Management & Research. Vol. 25, pp. 307–318.
- Barbalace, K. 2010. Periodic Table of Elements – Sorted by Electrical Conductivity.  
<http://www.environmentalchemistry.com/yogi/periodic/electrical.html>
- Bleiwas, D., Kelly, T. 2001. Obsolete Computers, “Gold Mines,” or High-Tech Trash? Resource Recovery from Recycling[R], United States Geological Survey, p. 7.
- Cambridge, MA: Management Sciences for Health. 2007. De gerentes que lideran: Un manual para mejorar los servicios de salud.
- Cheremisinoff, N.P., Cheremisinoff, P.N. 1995. Fiberglass Reinforced Plastics. Noyes Publications, USA, pp. 19–63.
- Chmielewski, A.G., Urbanski, T.S., Migdal, W. 1997. Separation technologies for metals recovery from industrial wastes. Hydrometallurgy. Vol. 45, pp. 333–344.
- Cui, J., Forssberg, E. 2003. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. Journal of Hazardous Materials. Vol. B99, pp. 243–263.
- Cui, J., Zhang, L. 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. Journal of Hazardous Materials. Vol. 158, pp. 228–256.
- Dalrymple, I., Wright, N., Kellner, R., Bains, N., Geraghty, K., Goosey, M., Lightfoot, L. 2007. An integrated approach to electronic waste (WEEE) recycling. Circuit World. Vol. 33, No. 2, pp.52–58.

- Deveci, H., Yazıcı, E.Y., Aydın, U., Yazıcı, R., Akcil, A. 2010. Extraction of copper from scrap TV boards by sulphuric acid leaching under oxidizing conditions. In: Proceedings of Going Green-CARE INNOVATION 2010 Conference, 8–11 November, Vienna, Austria, p. 45.
- Drechse, C. H. 2006. Mechanical Processes for Recycling Waste Electric and Electronic Equipment with the Rotor shredder and Rotor Impact Mill. *Aufbereitungs Technik*. Vol. 47.
- Duan, C., Wen, X., Shi, C., Zhao, Y., Wen, B., He, Y. 2009. Recovery of metals from waste printed circuit boards by a mechanical method using a water medium. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 166, No. 1, pp. 478–482.
- Galbraith, P., Devereux, J. L. 2002. Beneficiation of printed wiring boards with gravity concentration. In: IEEE International Symposium on Electronics & the Environment. pp. 242–248.
- Gallegos-Acevedo, P. M., Pérez-Garibay, R., Uribe-Salas, A., Nava-Alonso, F. 2007. Bubble load estimation in the froth zone to predict the concentrate mass flow rate of solids in column flotation. *Minerals Engineering* Vol. 20 pp. 1210-1217.
- Goosey, M., Kellner, R. 2002. A scoping study end-of-life printed circuit boards. [http://cfsd.org.uk/seeba/TD/reports/PCB\\_Study.pdf](http://cfsd.org.uk/seeba/TD/reports/PCB_Study.pdf)
- Gramatyka, P., Nowosielski, R., Sakiewicz, P. 2007. Recycling of waste electrical and electronic equipment. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Vol. 20, No. 1–2, pp. 535–538.
- Green, D. W., Perry R. H., 2009. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, Eighth Edition. Mc Graw-Hill. ISBN: 978007142294-9.
- Groot, D.R., Pistorius, P.C., 2008. Can we decrease the ecological footprint of base metal production by recycling? *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Vol. 108, pp. 161–169.

- Guo, J., Guo, J., Xu, Z. 2009. Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: a review. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 168, No. 2–3, pp. 567–590.
- Hagelüken, C. 2006a. Recycling of electronic scrap at Umicore precious metals refining. *Acta Metallurgica Slovaca*. Vol.12, pp. 111–120.
- Hagelüken, C. 2006b. Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling – a holistic approach for interface optimization between preprocessing and integrated metals smelting and refining. In; IEEE International Symposium on Electronics & the Environment. 8–11 May, San Francisco, pp.218–233.
- Hammond, C.R. 2005. Section 4: properties of the elements and inorganic compounds, magnetic susceptibility of the elements and inorganic compounds. In: Lide, D.R. (Ed.), *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Havlik, T., Orac, D., Petranikova, M., Miskufova, A., Kukurugya, F., Takacova, Z. 2010. Leaching of copper and tin from used printed circuit boards after thermal treatment. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 183, No. 1–3, pp. 866–873.
- Hayes, P. 1993. *Process Principles in Minerals and Materials Production*. Hayes Publishing Co., Sherwood, Australia, pp. 28–32.
- He, W., Li, G., Ma, X., Wang, H., Huang, J., Xu, M., Huang, C. 2006. WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. B136, pp. 502–512.
- Hester, R. E., Harrison, R. M. 2010. *Electronic Waste Management. Design, Analysis and Application*. RSC Publishing. ISBN: 978-1-84755-919-7. Pp. 263.
- Huang, K., Guo, J., Xu, Z. 2009. Recycling of waste printed circuit boards: a review of current technologies and treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 164, No. 2–3, pp. 399–408.

- Huang, K., Guo, J., Xu, Z. 2009. Recycling of waste printed circuit boards: a review of current technologies and treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 164, No. 2–3, pp. 399–408.
- Izar Landerta, J. M. 2004. *Las siete herramientas básicas de la calidad*. 1ª ed. ISBN: 970-705-021-7, Pp. 83-85.
- Kelly, E., Spottiswood, D. J. 1990. *Introducción procesamiento de minerales*. Editorial LIMUSA. pp. 530.
- Khetriwal, D.S., Kraeuchi, P., Widmer, R. 2009. Producer responsibility for e-waste management: key issues for consideration e learning from the Swiss experience. *Journal of Environmental Management*. Vol. 90, pp. 153–165.
- Kolodziej, B., Adamski, Z. 1984. Ferric chloride hydrometallurgical process for recovery of silver from electronic scrap materials. *Hydrometallurgy*. Vol. 12, pp. 117–127.
- Koyama, K., Tanaka, M., Lee, J. C. 2006. Copper leaching behavior from waste printed circuit board in ammoniacal alkaline solution. *Materials Transactions*. Vol. 47, No. 7, pp. 1788–1792.
- Kumar, V., Bee, D.J., Shirodkar, P.S., Tumkor, S., Bettig, B.P., Sutherland, J.W. 2005. Towards sustainable product and material flow cycles: identifying barriers to achieving product multi-use and zero waste. In: *Proceedings of IMECE 2005. 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.
- Lee, C. H., Tang, L. W., Popuri, S. R. 2010. A study on the recycling of scrap integrated circuits by leaching. *Waste Management & Research*. Vol. 29, pp. 1–9.
- Lee, J., Song, H.T., Yoo, J.M. 2007. Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea. *Resources, Conservation and Recycling* Vol. 50, pp. 380–397.

- Lehner, T. 1998. Integrated recycling of non-ferrous metal at Boliden Ltd. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. Vol. 1998, pp. 42–47.
- Li, J., Lu, H., Guo, J., Xu, Z., Zhou, Y. 2007. Recycle technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards. Environmental Science and Technology. Vol. 41, pp. 1995–2000.
- Li, J., Shrivastava, P., Gao, Z., Zhang, H. C. 2004. Printed circuit board recycling: a state-of-the-art survey. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing. Vol. 27, No. 1, pp. 33–42.
- Melo, F., Laskowski, J.S. 2005. Fundamental properties of flotation frothers and their effect on flotation. Minerals Engineering. Vol. 19, pp. 766-773.
- Montgomery, D. C. 2004. Diseño y análisis de experimentos. 2a ed. ISBN: 968-18-6156-6, Pp. 194-200.
- Nnorom, I.C., Osibanjo, O. 2008. Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries. Resources, Conservation and Recycling. Vol. 52, pp. 843–858.
- Ogunniyi, I. O., Vermaak, M. K. G. 2007. Improving printed circuit board physical processing – an overview. In: Proceedings of European Metallurgical Conference, Dusseldorf, Germany, pp. 1645–1656.
- Ogunniyi, I. O., Vermaak, M. K. G. 2009. Investigation of froth flotation for beneficiation of printed circuit board comminution fines. Minerals Engineering. Vol. 22, No.4, pp. 378–385.
- Petranikova, M. 2008. Treatment of End of Life Computers. Diploma de trabajo. Universidad Técnica de Kosice, Kosice, Eslovaquia.
- Quinet, P., Proost, J., Van Lierde, A. 2005. Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes. Minerals Metallurgical Process. Vol. 22, pp. 17–22.

- Sheng, P.P., Etsell, T. H. 2007. Recovery of gold from computer circuit board scraps using aquaregia. *Waste Management and Research*. Vol. 25, pp. 380–383.
- Shibata, J., Matsumoto, S. 1999. Development of Environmentally Friendly Leaching and Recovery Process of Gold and Silver from Wasted Electronic Parts. <http://www.environmental-expert.com>
- Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E. Y., Deveci, H. 2012. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*. Vol. 25, pp. 29-37.
- Umicore, Precious Metals Refining (Ed.). 2011. Precious Metals Refining Process, Germany. <http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Process> (retrieved 27.07.11).
- US Geological Survey: Mineral Commodity Summaries (Ed.), 2007. <<http://www.minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs>>.
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., Böni, H. 2005. Global perspectives on E-waste. *Environmental Impact Assessment Review* Vol. 25, pp. 436–458.
- Yazici, E.Y., Deveci, H. 2009. Recovery of metals from E-wastes. *The Journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey*. Vol. 48, No. 3, pp. 3–18.
- Yazici, E.Y., Deveci, H., Alp, I., Akcil, A., Yazıcı R. 2010. Characterization of Computer Printed Circuit Boards for Hazardous Properties and Beneficiation Studies. *Int. Mineral Processing Congress*. Vol. XXV, IMPC 2010, 6–10 September, Brisbane, Australia, pp. 4009–4015.
- Yoo, J.M., Jeong, J., Yoo, K., Lee, J., Kim, W. 2009. Enrichment of the metallic components from waste printed circuit boards by a mechanical separation process using a stamp mill. *Waste Management*. Vol. 29, pp. 1132–1137.

- Zhang, S., Forssberg, E. 1997. Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 21, pp. 247–269.
- Zhang, S., Forssberg, E. 1998. Mechanical recycling of electronics scrap - the current status and prospects. *Waste Management & Research*. Vol. 16, No. 2, pp. 119–128.
- Zhao, Y., Wen, X., Li, B., Tao, D., 2004. Recovery of copper from printed circuit boards. *Minerals and Metallurgical Processing*. Vol. 21, No. 2, pp. 99–102.

