

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, PETROQUÍMICA, AMBIENTAL Y ALIMENTOS



PROYECTO DE GRADO:

“APLICACIÓN DE PROCESO HIDROMETALURGICO PARA SEPARACIÓN DE COBALTO A PARTIR DE BATERIAS RECICLADAS DE ION LITIO PROCEDENTES DE CELULARES MOVILES DE LA CIUDAD DE LA PAZ, ESCALA BENCH”

PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

UNIV. DAYANA ESTEFANNY DURAN AVENDAÑO
UNIV. SHANTAL SILVANA GARAY MONTOYA

TUTORES:

ING.M.SC. BORIS PARRAGA ANDRADE
ING. DANIEL PEÑA DURAN

LA PAZ – BOLIVIA

2023



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

Dedicatoria

Hoy cuando vemos culminada esta etapa tan importante de nuestras vidas, queremos compartir nuestra dicha dedicando este proyecto primeramente a Dios y a su hijo Jesucristo por estar presente en nuestras vidas, llenándonos de bendiciones e iluminando nuestro camino para alcanzar nuestras metas, a nuestros padres por confiar en nosotras en todo momento, por su sacrificio y enseñarnos que con perseverancia y esfuerzo es posible lograr todo lo que uno se propone, a mis hermanos por ser parte de nuestras vidas y su apoyo incondicional.

Pon en manos del señor todas tus obras, y tus proyectos se cumplirán

Proverbios 16:3 (PDT)

Agradecimientos

Agradecer primeramente a Dios y su hijo Jesucristo por todo su amor, por permitirnos alcanzar esta meta en nuestras vidas, a nuestra familia por estar presente en todo momento, a nuestros tutores por su apoyo durante todo el desarrollo de nuestro proyecto.

Agradecer a los docentes de la carrera por transmitirnos todos sus conocimientos durante la etapa universitaria, y a todas las personas que nos apoyaron para que este proyecto sea posible.

Resumen

El presente documento representa una alternativa para la recuperación del cobalto contenido en las baterías de ion litio gastadas, ya que mediante una encuesta realizada al municipio de La Paz se estimó que una persona puede llegar a generar en 1 a 2 baterías al año. Por lo que mediante procesos mecánicos e hidrometalúrgicos se quiere dar un tratamiento a las baterías para obtener el material catódico. La evaluación de los parámetros termodinámicos permitió identificar las posibles reacciones del cobalto con el ácido sulfúrico y la adición de H_2O_2 durante la lixiviación. Partiendo de los resultados a escala laboratorio se conocieron los valores óptimos de los parámetros de la lixiviación de cobalto, para posteriormente con la cinética de lixiviación del cobalto siendo el modelo del núcleo que se encoge sin reaccionar controlada por la etapa de reacción química $tk = 1 - (1 - X_{Co})^{1/3}$; parámetros cinéticos $k = 0,0022 \text{ min}^{-1}$, $E_a = 10,37 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$ se realizó el comportamiento de la eficiencia de lixiviación en función del tiempo.

Con la información obtenida a escala laboratorio se realizó el cambio de escala del reactor a partir del cálculo de la relación de aumento de escala $R = 3$, el cambio de escala fue a partir del sistema de agitación. Los tamaños a escala laboratorio para un $V_{RL} = 375 \text{ cm}^3$ son: $D_{RL} = 7 \text{ cm}$, $D_{aL} = 3,5 \text{ cm}$, $E_L = 2,33 \text{ cm}$, $W_L = 0,7 \text{ cm}$, $N_L = 360 \text{ rpm}$, y escala bench para un reactor cuyo volumen es $V_{RB} = 10000 \text{ cm}^3$ son: $D_{RB} = 21 \text{ cm}$, $D_{aB} = 10,5 \text{ cm}$, $E_B = 7 \text{ cm}$, $W_B = 2,1 \text{ cm}$, $N_B = 173 \text{ rpm}$. Para el reactor a escala bench se realizó un análisis de transferencia de calor donde se determinó que el calor entregado al reactor tiene que ser aproximadamente de $Q_E = 114602 \text{ W}$. Al ser una reacción exotérmica se necesita eliminar el calor generado por la reacción $Q_{retirado} = 980 \text{ W}$ mediante un serpentín de enfriamiento ubicado en el interior del reactor.

Se realizó el estudio para el proceso de recuperación de cobalto de las baterías de ion litio donde primeramente fueron sometidas a un tratamiento físico mediante la separación mecánica con el uso de equipos a escala bench, el cual contempla como caso base el tratamiento de 10 toneladas de baterías anualmente y posteriormente un tratamiento químico donde se llega a recuperar 4,34 t/año de cobalto por lixiviación.

Abstract

This document represents an alternative for the recovery of the cobalt contained in spent lithium ion batteries, since through a survey carried out in the municipality of La Paz it was estimated that a person can generate 1 to 2 batteries per year. Therefore, by means of mechanical and hydrometallurgical processes, the batteries are to be treated to obtain the cathode material. The evaluation of the thermodynamic parameters allowed to identify the possible reactions of the cobalt with the sulfuric acid and the addition of H_2O_2 during the leaching. Starting from the results at the laboratory scale, the optimal values of the cobalt leaching parameters were known, for later with the cobalt leaching kinetics being the model of the nucleus that shrinks without reacting controlled by the chemical reaction stage $tk = 1 - (1 - X_{Co})^{1/3}$; kinetic parameters $k = 0,0022 \text{ min}^{-1}$, $E_a = 10,37 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$, the behavior of the leaching efficiency as a function of time was performed.

With the information obtained on a laboratory scale, the scale change of the reactor was made from the calculation of the scale increase ratio $R = 3$, the scale change was from the agitation system. Laboratory scale sizes for a $V_{RL} = 375 \text{ cm}^3$ are: $D_{RL} = 7 \text{ cm}$, $D_{aL} = 3,5 \text{ cm}$, $E_L = 2,33 \text{ cm}$, $W_L = 0,7 \text{ cm}$, $N_L = 360 \text{ rpm}$, and scale bench for a reactor whose volume is $V_{RB} = 10000 \text{ cm}^3$ son: $D_{RB} = 21 \text{ cm}$, $D_{aB} = 10,5 \text{ cm}$, $E_B = 7 \text{ cm}$, $W_B = 2,1 \text{ cm}$, $N_B = 173 \text{ rpm}$. For the bench-scale reactor, a heat transfer analysis was carried out where it was determined that the heat delivered to the reactor must be approximately $Q_E = 114602 \text{ W}$. Being an exothermic reaction, it is necessary to eliminate the heat generated by the reaction $Q_{retirado} = 980 \text{ W}$ through a cooling coil located inside the reactor.

The study was carried out for the process of recovering cobalt from lithium ion batteries where they were first subjected to a physical treatment through mechanical separation with the use of bench-scale equipment, which contemplates as a base case the treatment of 10 tons of batteries annually and subsequently a chemical treatment where 4.34 t/year of cobalt is recovered by leaching.

Índice de contenido

1.Introducción	21
1.1.Antecedentes	21
1.2.Planteamiento del problema	21
1.3.Objetivos	22
1.3.1.Objetivo general	22
1.3.2.Objetivos específicos	22
1.4.Justificación.....	22
1.4.1.Justificación de la investigación.....	22
1.4.2.Justificación social.....	22
1.4.3.Justificación ambiental	23
1.4.4.Justificación técnica	23
1.4.5.Justificación económica.....	23
2. Marco teórico	25
2.1. Baterías.....	25
2.1.1. Baterías primarias	25
2.1.2. Baterías secundarias.....	25
2.1.2.1. Baterías de Ion-litio.....	25
2.2. Cobalto.....	27
2.2.1. Fuentes de cobalto.....	28
2.3. Etapas del proceso de reciclado de baterías de ion litio	28
2.3.1. Descarga de las baterías.....	28
2.3.2. Separación mecánica	29
2.4. Métodos para la recuperación de cobalto de las baterías de ion-litio.....	32
2.4.1. Proceso pirometalúrgico.....	32
2.4.2. Proceso biohidrometalurgico	32
2.4.3. Proceso hidrometalúrgico.....	33

2.5. Lixiviación.....	34
2.5.1. Lixiviación por agitación (lixiviación dinámica)	35
2.5.2. Parámetros de la lixiviación	35
2.6. Separación y purificación del metal lixiviado.....	36
2.7. Reacciones fluido-sólido.....	37
2.7.1. Cinética de la lixiviación del cobalto	37
2.7.2. Modelo de núcleo que se escoge sin reaccionar	37
2.7.3. Control por la reacción química	38
2.8. Reactor	40
2.8.1. Volumen del reactor	41
2.8.2. Cinética Química	41
2.8.3. Velocidad de reacción y orden de reacción	41
2.8.4. Constante de velocidad de reacción.....	42
2.8.5. Tiempo de residencia	42
2.9. Agitador.....	42
2.9.1. Flujos axial, radial y tangencial	43
2.10. Escalamiento.....	44
2.10.1. Laboratorio	45
2.10.2. Bench (Banco).....	45
2.11. Aspectos importantes del escalado	45
2.12. Principios de similaridad.....	46
2.13. Método de escalado	47
2.13.1. Aumento de escala de los agitadores.....	47
2.14. Análisis dimensional	48
2.14.1. Teorema PI " π " de BUCKINGHAM.	48
2.15. Números adimensionales	49
3. Marco situacional	51

3.1. Problemática actual.....	51
3.2. Situación internacional	51
3.2.1. Empresas recuperadoras de Baterías	52
3.2.1.1. Proceso UMICORE	52
3.2.1.2. Proceso TOXCO	53
3.2.1.3. Proceso AEA.....	55
3.2.2. Generación.....	57
3.3. Situación nacional	57
3.3.1. Situación en la ciudad de La Paz	58
3.4. Normativa Nacional vigente referente al tema de residuos solidos	60
3.4.1. Constitución política del estado plurinacional de Bolivia	60
3.4.2. Ley del Medio Ambiente (Ley 1333).....	60
3.4.2.1. Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos.....	61
3.4.2.2. Reglamento para Actividades con Sustancias Peligrosas	61
3.4.2.3. Normas Bolivianas sobre gestión de RAEE.....	61
3.4.2.4. Ley de Gestión Integral de Residuos N°755	63
3.4.2.5. Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos, D.S. 2954	63
3.5. Convenios internacionales	64
3.5.1. El convenio de Basilea	64
3.5.2. El protocolo de Montreal.....	66
3.5.3. Acuerdos y programas internacionales en gestión de RAEE.....	67
4. Marco Práctico	69
4.1. Metodología (enfoque sistémico).....	69
4.2. Estimación de generación de baterías en el municipio de La Paz	69
4.2.1. Identificación del objeto de estudio.....	70
4.2.1.1. Ciclo de vida de las baterías.....	70
4.2.2. Importación, Ingreso y distribución	71

4.2.3. Distribución legal e ilegal.....	71
4.2.4. Comercialización.....	71
4.2.4.1. Vacíos de información identificada.....	71
4.3. Elaboración y aplicación de encuesta en el municipio de La Paz.....	72
4.3.1. Tamaño de la muestra para realizar la Encuesta.....	72
4.3.2. Diseño de encuesta.....	73
4.3.3. Generación de baterías de ion litio.....	75
4.4. Metodología (enfoque experimental).....	76
4.4.1. Acopio de las baterías.....	76
4.4.2. Descarga de las baterías.....	77
4.4.3. Secado de las baterías.....	77
4.4.4. Caracterización y Clasificación de las baterías.....	77
4.4.5. Desmantelamiento de las baterías.....	77
4.4.6. Separación del material catódico.....	77
4.4.8. secado.....	78
4.4.9. Molido y tamizado.....	78
4.4.10. Análisis químico del material catódico.....	78
4.5. Evaluación de los parámetros termodinámicos.....	79
4.6. Valores óptimos para la lixiviación del cobalto del material catódico.....	80
4.7. Cinética de lixiviación.....	80
4.7.1. Modelo cinético de la lixiviación del cobalto.....	81
4.7.2. Energía de activación.....	82
4.7.3. Eficiencia de lixiviación en función del tiempo.....	83
4.8. Metodología para el cambio de escala.....	83
4.8.1. volumen del reactor a escala laboratorio.....	83
4.8.2. Diseño del agitador.....	84
4.9. Determinación de los números adimensionales utilizando el análisis dimensional.....	86

4.10. Alcance del régimen estacionario	87
4.11. Cambio de escala.....	89
4.11.1. Determinación de las dimensiones del reactor a escala bench.....	91
4.12. Análisis de Transferencia de calor del reactor a escala bench	91
4.12.1. Calor entregado al reactor.....	91
4.12.2. Calor generado por la reacción	93
4.13. Proceso para la recuperación de cobalto de las baterías de ion litio a Escala Bench ..	
.....	96
4.13.1. Acopio de las baterías	98
4.13.1.1. Recolección y Transporte	98
4.13.2. Descripción del proceso	99
4.13.2.1. Descarga de las baterías.....	99
4.13.2.2. Secado de las baterías.....	100
4.13.3. Tratamiento mecánico	100
4.13.3.1. Características y especificaciones del equipo y maquinaria	100
4.13.4. Cálculos del proceso de recuperación de cobalto de las baterías de ion litio a Escala Bench.....	112
4.13.4.1. Trituración primaria de las baterías	113
4.13.4.2. Secado	116
4.13.4.3. trituración secundaria	119
4.13.4.4. separación magnética	120
4.13.4.5. tamizado.....	120
4.13.4.6. Separación neumática.....	122
4.13.4.7. Lixiviación.....	124
5. Análisis de datos y evaluación de resultados	127
5.1. Resultados de la encuesta	127
5.1.1. Presencia de Baterías de celular	127
5.1.2. Generación de Baterías de ion litio.....	127

5.2.Resultados de la parte experimental	128
5.2.1.Acopio de las baterías	128
5.2.2.Descarga de las baterías.....	128
5.2.3.Secado de las baterías.....	128
5.2.4.Caracterización y Clasificación de las baterías.....	129
5.2.5.Desmantelamiento de las baterías	129
5.2.6.Separación del material catódico.....	132
5.2.7.Filtración.....	132
5.2.8.Secado.....	132
5.2.9. Molido y tamizado	132
5.2.10. Análisis químico del material catódico	132
5.3.Evaluación de los parámetros termodinámicos	133
5.3.1.Diagrama Eh – pH.....	134
5.4.Valores óptimos para la lixiviación del cobalto del material catódico	135
5.5.Cinética de lixiviación	135
5.5.1.Modelo cinético de la lixiviación del cobalto.....	135
5.5.2.Energía de activación.....	137
5.5.3.Eficiencia de lixiviación en función del tiempo	137
5.6.Metodología para el cambio de escala	139
5.6.1.Volumen del reactor a escala laboratorio.....	139
5.6.2.Diseño del agitador	139
5.7.Determinación de los números adimensionales utilizando el análisis dimensional ...	142
5.8.Cambio de escala.....	144
5.8.1.Determinación de las dimensiones del reactor a escala bench.....	146
5.9.Análisis de Transferencia de calor del reactor a escala bench	147
5.9.1.Calor entregado al reactor	147
5.9.2.Calor generado por la reacción	147

5.10.Resultados del proceso de recuperación de cobalto de las baterías de ion litio a Escala Bench.....	151
5.10.1.Trituración primaria de las baterías	151
5.10.2.Secado	152
5.10.3.Trituración secundaria	155
5.10.4.Separación magnética.....	155
5.10.5.Tamizado	156
5.10.6.Separación neumática.....	157
5.10.7.Lixiviación.....	160
6.Conclusiones y Recomendaciones.....	164
6.1. Conclusiones.....	164
6.2.Recomendaciones.....	165
7.Bibliografía	168
ANEXOS	188
Anexo A.	188
Anexo B.	198
Anexo C.	199
Anexo D.	201
Anexo E.	202
Anexo F.	204

Índice de figuras

Figura 1 Control químico.	38
Figura 2 Tipos de Agitadores para viscosidades moderadas.....	43
Figura 3 Tipos de Agitadores para alta viscosidad.....	43
Figura 4 Representación de flujos: Radial, axial y tangencial	44
Figura 5 proceso de escalado	45

Figura 6	diagrama de flujo reciclaje de baterías Umicore para el aprovechamiento de las baterías ion litio y NiMH	53
Figura 7	Diagrama de flujo reciclaje de baterías TOXCO	54
Figura 8	Diagrama de flujo reciclaje de baterías AEA.....	56
Figura 9	Bolivia, Material educativo para separación de pilas y baterías en La Paz	58
Figura 10	Diagrama gestión de pilas y baterías en el Municipio de La Paz por el GMLP .	59
Figura 11	Flujograma del enfoque sistémico de gestión ambiental aplicado al proyecto .	69
Figura 12	flujograma de estimación de generación de baterías	69
Figura 13	Metodología experimental del proceso	76
Figura 14	Secado del material catódico.....	78
Figura 15	Dimensiones para la turbina	85
Figura 16	Concentración vs tiempo	88
Figura 17	conducción a través de una superficie curva	92
Figura 18	Diagrama del proceso para la recuperación de cobalto de las baterías de ion litio a Escala Bench.....	97
Figura 19	Esquema de recolección diferenciada	99
Figura 20	Secador para la planta escala bench.....	101
Figura 21	Trituradora de matillo para la planta escala bench.....	102
Figura 22	esquema del secador rotatorio empleado	103
Figura 23	Molino de bolas para la planta escala bench	105
Figura 24	separador magnético de banda	106
Figura 25	separador de banda para la planta escala bench	107
Figura 26	Criba de vibración rotatoria para la planta escala bench.....	108
Figura 27	Esquema del separador neumático para la planta escala bench	109
Figura 28	Reactor químico para la planta escala bench	112
Figura 29	Baterías de ion litio recolectadas	128
Figura 30	secado de las baterías de ion litio.....	129
Figura 31	Composición de una batería de ion litio	131

Figura 32	separación del material catódico con una solución de NaOH	132
Figura 33	Diagrama de rayos X del material catódico.....	133
Figura 34	Diagrama de equilibrio potencial Eh - pH para el sistema Co - H ₂ O.....	134
Figura 35	Análisis cinético de la lixiviación de Cobalto del material catódico con ácido sulfúrico	136
Figura 36	Eficiencia de lixiviación en función del tiempo	138
Figura 37	Número de potencia (Np) en función de Reynolds (Re) para un sistema de agitación "normal".	141
Figura 38	Diagrama del reactor de lixiviación	150
Figura 39	Diagrama del proceso.....	150
Figura 40	balance de masa de la recuperación de cobalto de las baterías de ion litio a Escala Bench.....	162

Índice de tablas

Tabla 1	Efectos en la salud del ser humano por contaminación de elementos contenidos en las baterías de ion-litio	27
Tabla 2	Algunas Empresas Europeas de reciclado y tratamiento de pilas y baterías ...	51
Tabla 3	Tasa de generación de pilas y baterías de estados unidos, argentina y España	57
Tabla 4	estimación de generación de pilas y baterías de latino América	57
Tabla 5	Generación de pilas primarias y secundarias	59
Tabla 6	Normas Bolivianas sobre gestión de RAEE	62
Tabla 7	Artículos de la Gestión integral de residuos sólidos Ley N° 755	63
Tabla 8	Artículo 47 del Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos, D.S. 2954.....	64
Tabla 9	Desechos de metales y desechos que contengan metales.....	64
Tabla 10	Clasificación, composición y usos de pilas y baterías en argentina, convenio .	66
Tabla 11	Caracterización de baterías por tipo	70
Tabla 12	Base de datos encuestas de baterías de celular en el Municipio de La Paz	73

Tabla 13	Datos termodinámicos del óxido de litio cobalto LiCoO_2	79
Tabla 14	Ecuaciones cinéticas consideradas para la lixiviación de cobalto	81
Tabla 15	Proporciones geométricas para un sistema de agitación	84
Tabla 16	valores de " n "	90
Tabla 17	especificaciones - secador	100
Tabla 18	especificaciones – trituradora de martillo	102
Tabla 19	especificaciones – Molino de bolas.....	104
Tabla 20	especificaciones – Separador magnético de banda.....	106
Tabla 21	especificaciones – Tamizado.....	107
Tabla 22	especificaciones – Separación neumática	109
Tabla 23	condiciones de operación óptimas para la lixiviación de cobalto del material catódico de las baterías de ion litio recicladas.....	111
Tabla 24	especificaciones – Reactor químico.....	111
Tabla 25	Balance de masa en la recepción y descarga de las baterías.....	113
Tabla 26	Composición y densidades de los componentes de una batería de ion litio...	114
Tabla 27	Propiedades termodinámicas de los componentes del electrolito	118
Tabla 28	Propiedades termodinámicas del resto de componentes de la corriente sólida alimentada.	119
Tabla 29	Parámetros necesarios para calcular la velocidad del aire	123
Tabla 30	Clasificación de las baterías de ion litio recicladas	129
Tabla 31	Componentes de una batería	130
Tabla 32	Masa de los componentes de las baterías.....	131
Tabla 33	Valores termodinámicos para la reacción 2	133
Tabla 34	Valores óptimos de los parámetros operacionales para la lixiviación de cobalto del material catódico de las baterías de ion litio recicladas.....	135
Tabla 35	Eficiencia de la lixiviación en función del tiempo.....	138
Tabla 36	Dimensiones del reactor a escala laboratorio	139
Tabla 37	parámetros para el cálculo del número de Reynolds	141

Tabla 38	variables significativas	142
Tabla 39	Resultados del escalado.....	145
Tabla 40	Dimensiones del reactor a escala Bench	146
Tabla 41	Parámetros de operación, dimensiones y material sugerido del serpentín de enfriamiento	149
Tabla 42	balance de masa de la etapa de trituración primaria (<i>T1</i>)	152
Tabla 43	Balance de masa de la etapa de secado (SE)	154
Tabla 44	Balance de masa de la etapa de trituración secundaria (T2)	155
Tabla 45	Balance de masa en la etapa de separación magnética (<i>SM</i>)	156
Tabla 46	Balance de masa de la etapa de tamizado (<i>FTA</i>)	157
Tabla 47	Balance de masa de la etapa de separación neumática (<i>FSN</i>)	158
Tabla 48	Balance de masa de la etapa de lixiviado	161

Símbolos y Abreviaturas

MMAyA, Ministerio de Medio Ambiente y Agua

YLB Yacimientos de Litio Bolivianos

DMC carbonato de dimetilo

EMC carbonato de metilo y etilo

EC carbonato de etileno

PC carbonato de propileno

CHB ciclohexilbenceno

DEC carbonato de dietilo

PP polipropileno

PE polietileno

PTFE politetrafluoroetileno

PVDF fluoruro de polivinilideno

HF fluoruro de hidrogeno

INE Instituto Nacional de Estadística

RAEE Residuos de Aparatos y Equipos Electrónicos

LIB's Baterías de Ion Litio

PML Producción Más Limpia

RSE responsabilidad social empresarial
 REP responsabilidad extendida del productor
 SAO sustancias agotadoras de ozono
 CFC clorofluorocarbonos
 EBRA European Battery Recycling Association
 PFR reactor de flujo pistón
 DRX difracción de rayos X
 EAA Espectroscopia de absorción atómica
 ΔG Energía libre de Gibbs [kJ]
 ΔH Entalpía [kJ/K]
 ΔS Entropía [kJ]
 pH Concentración de iones hidrogeno
 Eh potencial redox con respecto al electrodo de hidrogeno estandar

t = tiempo de lixiviación [s]

τ = tiempo de lixiviación total del sólido [*Horas*]

X_{Co} = eficiencia de lixiviación del cobalto (valores entre 0 y 1)

R = radio externo de la partícula de tamaño fijo

ρ_{Co} = densidad de partícula

b = coeficiente estequiométrico de la fase sólida

C_{AL} = concentración del reactivo en la fase liquida

K_s = constante cinética de primer orden para la reacción superficial

k = constante de velocidad cinética el cual depende de la temperatura [s^{-1}]

n = Encuestas por realizar

Z = Nivel de confianza

N = unidades familiares

Generación = Generación [*TON*]

e = Error de muestreo estimado en un 5%

h_t = numero de hogares en el municipio de La Paz el año 2012

p_t = penetración de baterías usadas

a_t = Numero de baterías en el hogar

V_u = tiempo de vida útil de las baterías usadas [*años*]

X_B = eficiencia de lixiviación

k_1, k_2 = constante de velocidad cinética

R = constante gaseosa [$cal/mol * K$]

T_1, T_2 = temperatura [°C]
 E_a = energía de activación [kcal/mol]
 D_{RL} =diámetro del reactor a escala laboratorio [cm]
 $V_{soluciónL}$ =volumen de la solución a escala laboratorio [cm³]
 V_{SL} = volumen de seguridad a escala laboratorio [cm³]
 V_{RL} = volumen del reactor a escala laboratorio [cm³]
 %factor de seguridad =Factor de seguridad a escala laboratorio
 L_{RL} = altura del reactor a escala laboratorio [cm]
 D_a = Diámetro del agitador [cm]
 D_R = Diámetro del reactor [cm]
 H = Altura óptima del liquido [cm]
 J = Ancho de los deflectores [cm]
 W = Ancho de las paletas [cm]
 L = Longitud de las paletas [cm]
 E = distancia entre la parte inferior del tanque al centro de la turbina [cm]
 N = Velocidad del agitador [rev/min] o [rpm]
 ρ = Densidad del fluido [Kg/m³]
 μ = Viscosidad dinámica del fluido [Kg/m * s]
 P = Potencia del agitador [J/s] o [W]
 N_B = Velocidad del agitador a escala bench [rev/min] o [rpm]
 N_L = Velocidad del agitador a escala laboratorio [rev/min] o [rpm]
 t_L = tiempo de lixiviación a escala laboratorio [s]
 t_B = tiempo de lixiviación a escala Bench [s]
 D_{aL} =diámetro del agitador a escala laboratorio [cm]
 D_{aB} =diámetro del agitador a escala Bench [cm]
 D_{aB} =diámetro del agitador a escala Bench [cm]
 D_{RB} = diámetro del reactor a escala Bench [cm]
 L_{RB} = altura del reactor a escala bench [cm]
 V_{RB} = volumen del reactor a escala bench [cm³]
 D_{RB} = Diámetro del reactor a escala bench [cm³]
 Q_E =calor entregado al sistema [W]
 T_1 = Temperatura en el interior del reactor [°C]
 T_2 = Temperatura en el exterior del reactor [°C]

r_1 = radio interno del reactor [cm]

r_2 = radio externo del reactor [cm]

k_{acinox} = coeficiente de conductividad térmica del acero inoxidable 316L $\left[\frac{W}{m^{\circ}C}\right]$

N_s = Cantidad de vueltas del serpentín en el reactor

Q_{H2O} = flujo volumétrico del agua [m^3/s]

F_{H2O} = flujo másico del agua [kg/s]

$v_{circulación}$ = velocidad de circulación [m/s]

Q_{genera} = calor generado por la reacción [KJ]

m_{H2O} = masa de agua requerido para el enfriamiento [kg]

Cp_{H2O} = capacidad calorífica del agua $\left[\frac{kJ}{kg^{\circ}C}\right]$

T_{ss} = temperatura de salida del agua [$^{\circ}C$]

T_{es} = temperatura de entrada del agua [$^{\circ}C$]

U = coeficiente global de transferencia de calor $\left[\frac{W}{m^2^{\circ}C}\right]$

A_{total} = área total de transferencia de calor [m^2]

$LMTD$ = temperatura media logarítmica [$^{\circ}C$]

T_{SS} = Temperatura de salida del agua del serpentín [$^{\circ}C$]

T_{ES} = Temperatura de entrada del agua al serpentín [$^{\circ}C$]

T_1 = Temperatura en el interior del reactor [$^{\circ}C$]

VAN= Valor Actual Neto

TIR= Tasa Interna de Retorno

CAPITULO I

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) y la firma alemana ACI Systems GmbH firmaron un acuerdo para el funcionamiento de una planta, para la fabricación de baterías de litio en el salar de Uyuni, considerado una de las más grandes reservas de litio del mundo ⁽¹⁾. Sin embargo, aún no se tomaron en cuenta la proyección de generación de residuos que esta representaría. En octubre de 2015 se puso en vigencia la Ley 755 de Gestión Integral de Residuos Sólidos, con lo que se dio marcha a programas de reutilización de residuos sólidos, que de acuerdo con el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), y gracias al Programa de Gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) impulsado por el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz, y otras empresas como Kiosco Verde, Fundare, Fundación VIVA y Recicla, pretenden mejorar la disposición de estos residuos mediante el acopio de los mismos para disposición en cámaras sépticas que contienen botellones plásticos de 20 l con pilas y baterías evitando así, que los residuos o sus lixiviados lleguen a cuerpos de agua, o generen pasivos ambientales de impacto perjudicial. Sin embargo, el acopio en cámaras realizado actualmente no cierra el ciclo de reutilización de los residuos, por ello, es importante buscar reducir el volumen de almacenamiento de los mismos y generar mediante un tratamiento adecuado proceso de reciclaje aprovechando de sus componentes, el cual llegue a impulsar una economía circular, teniendo en cuenta que metales como el níquel y cobalto, tienen un alto costo en el mercado. Según lo comercializado en octubre de 2016, el Ni tiene un precio de \$ 10 por kg y el Co \$ 28 por kg, siendo el cobalto un metal con un precio creciente en el mercado ⁽²⁾.

1.2. Planteamiento del problema

En la ciudad de La Paz el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz, y otras empresas como Kiosco Verde, Fundare, Fundación VIVA, y Recicla, actualmente trabajan en las etapas de recolección, acopio y almacenamiento de baterías, sin realizar proyectos con el enfoque de recuperar metales presentes en las baterías, por tal hecho el proyecto pretende recuperar cobalto mediante un proceso hidrometalúrgico a partir de baterías recicladas de ion litio procedentes de celulares móviles de la ciudad de la paz, escala bench.

¹ (DEBER, 2018)

² (Kwade & Diekmann, Recycling of Lithium-Ion Batteries, 2018)

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Recuperar cobalto aplicando un proceso hidrometalúrgico a partir de baterías recicladas de ion litio procedentes de celulares móviles de la ciudad de La Paz, a escala bench.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar cualitativamente y cuantitativamente las baterías, mediante pruebas de laboratorio.
- Evaluar parámetros termodinámicos, como energía libre de Gibbs, entalpía, temperatura, pH para identificación de condiciones favorables para la recuperación de cobalto por lixiviación.
- Determinar la constante de velocidad cinética y la energía de activación del proceso de lixiviación de cobalto mediante modelos matemáticos y parámetros cinéticos, para la determinación de la cinética de lixiviación del cobalto.
- Determinar los números adimensionales y los parámetros de escala para llevar el proceso de lixiviación de Cobalto a Escala Bench mediante la aplicación de modelos de escala (Modelo de Pi (π) de Buckingham) y Principios de similitud.
- Validar el modelo matemático obtenido mediante aplicación del proceso por Simulación o laboratorio.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación de la investigación

El proyecto se desarrolla en marco del cumplimiento de la Resolución HCC N° 079/2011 y Resolución HCC N°124/2011 de la Carrera de Ingeniería Química. Con el fin de desarrollar proyectos que aporten al conocimiento de la sociedad en conjunto, aplicando las herramientas y los conocimientos adquiridos en la formación académica en la carrera de Ingeniería Ambiental que será complementado con la investigación.

1.4.2. Justificación social

El proyecto pretende ser un referente para futuras investigaciones y puesta en marcha de una planta para el proceso de recuperación de cobalto presente en las baterías de ion litio. Mediante el estudio de nuevas aplicaciones que ayudara en alguna medida al desarrollo de tecnologías y conocimientos, incrementando la calidad de vida del país.

1.4.3. Justificación ambiental

La explotación de litio permite generar ingresos con la producción de baterías de ion litio, sin embargo, sus componentes generaran un impacto ambiental pasada su vida útil. Si bien el proyecto generara un cierto impacto ambiental este será debidamente controlado, por lo que será mucho menor al que se genera al no tener ningún tipo de tratamiento.

1.4.4. Justificación técnica

Mediante el proceso de Lixiviación se puede llegar a optimizar la recuperación de cobalto, este proceso frecuentemente se hace a partir de ácidos como el sulfúrico, clorhídrico y nítrico, dado que son los que reportan una alta tasa para separar el metal del resto de la estructura de la batería.

1.4.5. Justificación económica

La creciente demanda de cobalto ha incrementado su precio en el mercado, de manera que esto representa un interés económico para el país. Por lo tanto, es necesario desarrollar un proceso que recupere cobalto para incrementar el rendimiento.

Puesto que metales como el níquel y cobalto, tienen un alto costo en el mercado. Según lo comercializado en octubre de 2016, el Ni tiene un precio de \$ 10 por kg y el Co \$ 28 por kg, siendo el cobalto un metal con un precio creciente en el mercado ⁽³⁾.

³ (Kwade & Diekmann, Recycling of Lithium-Ion Batteries, 2018)

CAPITULO II



2. Marco teórico

2.1. Baterías

Se puede entender por batería, de manera general, a un dispositivo donde se almacena energía química para ser liberada después en forma de energía eléctrica mediante un proceso espontáneo, de oxidación (pérdida de electrones) – reducción (ganancia de electrones). La mayoría de las baterías conforman en su estructura metales pesados y otros elementos nocivos muchos de ellos perjudiciales para el medio ambiente, se clasifican en:

2.1.1. Baterías primarias

Este tipo de baterías denominadas comercialmente también como pilas, se caracterizan por una vez convertida la energía eléctrica, ya no puede volver a cargarse (irreversible). Las baterías primarias suelen ser una fuente de almacenamiento conveniente, de bajo costo y livianas, haciéndolas acorde para aplicaciones que involucren dispositivos electrónicos, iluminación, cámaras eléctricas, juguetes entre otras numerosas aplicaciones.

2.1.2. Baterías secundarias

Este tipo de baterías tienen la característica de ser recargable, es decir, requieren de una fuente de carga para su estado de carga completa. Dentro de esta clasificación se encuentran las baterías: plomo-acido, níquel-cadmio, níquel-metal hidruro y ion litio siendo las de ion litio las estudiadas en el presente trabajo.

2.1.2.1. Baterías de Ion-litio

En 1991 la compañía Sony lanzo la primera batería de Ion-Litio utilizando LiCoO_2 como material catódico⁴. Compuesto de metales valiosos como aluminio, cobalto, cobre, litio, níquel y manganeso. Las baterías de iones de litio, tienen la siguiente composición:

Cátodo (electrodo positivo): Es una placa de aluminio recubierta en óxido de Cobalto y Litio (LiCoO_2)⁵, y el aglutinante PVDF que hace que el cátodo este unido al aluminio.

Ánodo (electrodo negativo): Placa de cobre recubierto de carbón grafito⁶ y aglutinante PVDF⁷.

Separador: material hecho de polímeros (polietileno (PE) o polipropileno (PP))⁸micro poroso (separa el ánodo y el cátodo), permite el movimiento de los iones a través de la batería entre el ánodo y el cátodo.

⁴ (VELEZ SANTA, 2015)

⁵ (Cesta Torres & Villa Auquilla , 2019)

⁶ (Takacova, Havlik, Kukurugya, & Orac, 2016)

⁷ (Golmohammadzadeh, Rashchi, & Vahidi, 2017)

⁸ (Zeng, Li, & Narendra, 2014)

Electrolito: En el que se sumergen ánodo, cátodo y separador, encargado de la transferencia de carga entre el cátodo y el ánodo. Incluye solutos y solventes, emplea como soluto una sal de litio (LiClO_4 , LiPF_6 , LiBF_4 , LiCF_3SO_3 , o $\text{Li}(\text{SO}_2\text{CF}_3)_2$)⁹, siendo el hexafluorofosfato de litio (LiPF_6) el más utilizado para la movilidad de los iones¹⁰, disuelta en un líquido orgánico (peligroso por su carácter inflamable), que incluye carbonato de propileno (PC), carbonato de etileno (EC), carbonato de dimetilo (DMC), y el etil metil carbonato (EMC). El carbonato de dimetilo (DMC), carbonato de metilo y etilo (EMC) son componentes de punto de ebullición ligero con temperaturas de ebullición de 90 °C a presión ambiente.

Los disolventes de alto punto de ebullición están entre 243 y 244 °C (EC), 240 °C (PC) y 239–240 °C (CHB)¹¹. Produce gases peligrosos como el fluoruro de hidrogeno (HF), cloro (Cl_2), dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO) cuando se quema¹².

Aproximadamente la composición de una batería de ion-litio oscila entre un "5-20% de cobalto, 5-10% de níquel, 5-7% de litio, 15% de productos químicos orgánicos y 7% plásticos"¹³, se debe tener en cuenta que no todas las baterías son iguales¹⁴ por lo que no cuentan con la misma composición, pueden variar según la marca, tipo y/o referencia de la misma.

una vez expuestos los diferentes materiales de los cuales conforman los componentes de una batería a continuación se mencionan los riesgos ambientales de algunos de estos materiales:

Cátodo: los metales pesados que contiene son peligrosos para la vida humana y la naturaleza.

Aglutinante: compuesto por fluoruro de polivinilideno (PVDF) o politetrafluoroetileno (PTFE), que dificulta la separación del cátodo de la lámina de aluminio y del grafito del cobre. Cuando se somete al calor este comienza a producir gases como el fluoruro de hidrogeno (HF)¹⁵.

En la Tabla 1 tenemos algunos aspectos relevantes de la toxicidad de los metales pesados que podemos encontrar dentro de una batería:

⁹ (Golmohammadzadeh, Rashchi, & Vahidi, 2017)

¹⁰ (Iglesias, y otros, 2012)

¹¹ (Kwade, Arno; Diekmann, Jan, 2018)

¹² (Zheng, y otros, 2018)

¹³ (Ordoñez, Gago, & Girard, 2015)

¹⁴ (Zeng, Li, & Narendra, 2014)

¹⁵ (Zheng, y otros, 2018)

Tabla 1 Efectos en la salud del ser humano por contaminación de elementos contenidos en las baterías de ion-litio

Elementos	Principales efectos en la salud	Elementos	Principales efectos en la salud
Cobalto (Co)	Dermatitis, daños en las células del cuerpo	Litio (Li)	Fallas respiratorias, depresión del miocardio, edema pulmonar y estupor profundo.
Manganeso (Mn)	Alteraciones en el desarrollo del cerebro y sistema nervioso, mal formación en los fetos.	Níquel (Ni)	Problemas en el tracto respiratorio y/o cáncer de pulmón, alergia cutánea, asma, dolores de estómago y efectos adversos.

Fuente: ATSDR¹⁶; U.S.EPA¹⁷; OMS¹⁸

2.2. Cobalto

El cobalto es un metal de color grisáceo o blanco azulado o rojizo. Es el metal más escaso en la corteza terrestre, y el más caro, en la última década, debido a la creciente demanda como componente básico de las baterías de iones de litio con las que funcionan los teléfonos móviles, ordenadores y coches eléctricos su producción ha aumentado considerablemente. Cada año el 45% de la producción global de cobalto se utiliza en la fabricación de baterías de litio según el Instituto de Desarrollo del Cobalto (CDI)¹⁹.

Según el Instituto de Desarrollo del Cobalto (CDI), una organización internacional creada en 1982 para defender la producción y el uso responsable de este metal, el año 2017 la producción de este metal fue de 123.000 toneladas, un 2,4% menos que el año anterior²⁰. Según Bloomberg New Energy Finance (BNEF), la proporción del cobalto utilizado en la fabricación de vehículos eléctricos pasó del 1 % en 2014 al 8 %, y podría llegar al 49 % hacia 2030²¹.

¹⁶ (Agency for Toxic Substances and Disease Registry/USA)

¹⁷ (U.S. Environmental Protection Agency)

¹⁸ (Organización Mundial de la Salud)

¹⁹ (BBC MUNDO, 2017)

²⁰ (Economipedia (HACIENDO FACIL LA ECONOMIA), 2018)

²¹ (BBVA Research, 2018)

2.2.1. Fuentes de cobalto

Los principales países en donde se puede obtener cobalto son la República democrática del Congo, Marruecos y Canadá²². Siendo más de la mitad del suministro mundial de cobalto extraído de las minas de la República Democrática del Congo. En 2021, el primer país productor de cobalto fue la República Democrática del Congo, con aproximadamente 120.000 toneladas métricas producidas, seguida de Rusia, con una cifra de alrededor de 7.600 toneladas métricas²³.

2.3. Etapas del proceso de reciclado de baterías de ion litio

Debido al constante crecimiento de los celulares, y por ende la generación de residuos principalmente de las baterías de ion litio al final de su vida útil requiere de estrategias de gestión que permitan su reciclado, a la vez proporcionar beneficios económicos y ambientales.

2.3.1. Descarga de las baterías

Antes de que las baterías sean sometidas algún tipo de tratamiento es de vital importancia descargar las baterías para asegurar la manipulación de las mismas, ya que presentan comúnmente una carga residual, por lo que su manipulación es de alto riesgo. Principalmente, el electrolito que se compone de un líquido inflamable que se encuentra bajo presión en la cavidad de la celda, por lo que cualquier escape producido durante su manipulación, o por degradación de sus materiales, pueda derivar en una explosión²⁴.

Existen diversos tratamientos de descargas como:

Tratamiento en atmosfera controlada: se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, para evitar combustión. Estas atmósferas suelen consistir en nitrógeno, dióxido de carbono, o mezcla de éste con argón²⁵.

Inmersión en solución salina: también propuesto para uso industrial consiste inmersión en una disolución salina. Ésta suele componerse de agua con cloruro o sulfato sódico. No recomendado para baterías de vehículos que normalmente tienen alto voltaje²⁶.

En el caso de las baterías deben ser sometidos a algunos tipos de procesos físicos de pre tratamiento para su posterior lixiviación (tratamiento químico).

²² (BBC MUNDO, 2017)

²³ (Ranking de los principales países productores de cobalto a nivel mundial en 2021, 2022)

²⁴ (Reunidas, Estudio de tecnologías de reciclado de baterías de ión-litio. Febrero 2020: Madrid., 2020)

²⁵ (Pinegar & Smith, 2019)

²⁶ (Harper, y otros, Publisher Correction: Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles., 2020)

2.3.2. Separación mecánica

Implica procesos de desmantelamiento o trituración, molienda y clasificación para obtener el material catódico. A una escala comercial es más rentable la separación mecánica con equipos y un posterior procedimiento hidrometalúrgico para la recuperación de cobalto²⁷.

En el caso de la separación manual, donde implica el desprendimiento de las partes de la batería, la recolección de material proveniente del cátodo propone una secuencia para separar el aluminio del resto de los metales presentes en el cátodo por medio de hidróxido de sodio y posteriormente lixiviar el cobalto con una mezcla de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno; para la separación del cobre se sugiere el mismo proceso.

(Betancur Pulgarin, 2016) propone someter el material a procesos mecánicos de reducción de tamaño el cual consiste en dos etapas de trituración, la primera a través de una trituradora de cuchillas después del cual sale la mayor cantidad del material de descarte (carcasa, plásticos, papel) y luego una segunda trituración con un molino de rodillos con el fin de lograr tanto una reducción de tamaño del material constituyente de los electrodos y a la vez retirar la mayor cantidad de contaminación proveniente de los sustratos de aluminio y cobre sobre los que se encontraban los electrodos.

Los procesos de separación mecánica con equipos que se han encontrado son los siguientes:

- a) Triturado de las baterías: consiste en la disminución del tamaño de las baterías facilitando el trabajo para las etapas posteriores. Generalmente, para esta operación se utiliza una trituradora de doble eje²⁸.
- b) Separación magnética: consiste en la aplicación de un fuerte campo magnético a los componentes ferrosos (carcasa metálica) al paso de la corriente de material ya triturado²⁹. Concretamente, la propiedad que permite la separación del acero del resto de materiales es la susceptibilidad magnética (x_m , adimensional), cuyo valor es elevado hace que sea atraído a un campo magnético y nulo o negativo en caso contrario³⁰.
- c) Separación del electrolito: a continuación, se describe los siguientes procesos para la recuperación del electrolito:
 - Separación térmica del electrolito

Para el reciclaje de baterías de ion litio estas deben ser trituradas, pero antes deben ser secadas. Esto es importante no solo por la simplificación de la separación del material, sino

²⁷ (Estrada Ramírez, 2020)

²⁸ (Reunidas, Informe de Tecnologías de Reciclado de Baterías de Litio, 2021)

²⁹ (Reunidas, Informe de Tecnologías de Reciclado de Baterías de Litio, 2021)

³⁰ (Berger, y otros, 2014)

también por cuestiones de seguridad. La mezcla de electrolito y aire tiene un impacto ambiental el cual puede crear una atmósfera explosiva (debido a la composición del electrolito), El secado se puede lograr a alta temperatura, baja presión y enjuague con gas de inertización, esta combinación de parámetros es realizadas mediante investigaciones experimentales de secado³¹.

La temperatura máxima establecida es de 120°C para un proceso de secado a 0,1 bar. Como se muestra antes, la temperatura debe aumentarse durante el proceso de secado para permitir la eliminación de electrolito, Una vez que se alcanza la temperatura máxima definida, se genera un flujo de nitrógeno. aplicado para permitir un mayor secado. Tomando en cuenta controlar que el proceso de secado no se debe alcanzar temperaturas de ebullición controlando con la disminución de presión para que esta genere un sistema no explosivo³².

Se utilizará el proceso LithoRec el cual incluye una extracción por solvente antes del secado. La extracción se usa para eliminar la sal conductora, pero también tiene la posibilidad de reducir el contenido de alto punto de ebullición en el material dependiendo de la elección del agente de extracción. Un alto exceso del solvente usado para la extracción conducirá a una dilución del electrolito con solvente. El carbonato de dimetilo se utiliza preferentemente como disolvente de extracción, puesto que ya está presente en el proceso.

- Separación del electrolito mediante disolvente de extracción

La extracción de electrolitos de baterías de iones de litio es una posibilidad para eliminar los componentes orgánicos de alto punto de ebullición y la sal conductora del material de batería en el reciclaje de baterías de iones de litio³³.

El agente se mezcla con material de batería molido, la sal conductora y orgánico los carbonatos se transfieren a la fase líquida. El material sólido se seca después. para evaporar el agente de extracción (como acetonitrilo, etanol y acetona) de punto de ebullición ligero restante. Por lo tanto, solo quedan pequeñas concentraciones del electrolito en el material de la batería que se transfiere a los procesos hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos para recuperar los compuestos de valor metálico (litio, manganeso y cobalto) de los ánodos y cátodos³⁴. Las concentraciones de las muestras para la extracción de litio hexafluorofosfato en el extracto para temperaturas de 10, 20, 30 y 40 °C con un tiempo máximo de extracción de 120 min. La especificación para procesos hidrometalúrgicos de 10 mg de fluoruro por kg activo material no se cumplió con las extracciones de una sola etapa. El fluoruro restante,

³¹ (Kwade & Diekmann, Recycling of Lithium-Ion Batteries, 2018)

³² (Kwade & Diekmann, Recycling of Lithium-Ion Batteries, 2018)

³³ (Nowak & Winter, 2015)

³⁴ (Grützke, y otros, 2015)

incluida la concentración de hexafluorofosfato, sigue siendo demasiado alta. De este modo, que las extracciones de etapas múltiples para determinar la cantidad necesaria de solvente y el número necesario de etapas de extracción para eliminar el hexafluorofosfato tan lejos como sea posible³⁵.

- Extracción de electrolitos mediante sub y CO₂ supercrítico

La capacidad de dióxido de carbono presurizado para extraer el electrolito de comercial disponible LIBs a escala de laboratorio. Se consideran dos fases diferentes del dióxido de carbono. (subcrítica y supercrítica), considerando como mejor fase la subpercritica debido que al trabajar con altas temperaturas y presión respectivamente supercrítico (40 °C, 300 bares) la recuperación lograda durante sistemáticamente duraciones extendidas de extracción a partir de 2 a 20 min en intervalos de tiempo fijos de 2 minutos la mayor cantidad de electrolito es posible diluirlo, por lo que el CO₂ subcrítico parece ser más eficaz³⁶.

d) Tamizado: tiene como objetivo la separación de las partículas donde se encuentran los metales de interés de los demás componentes (plásticos, aluminio y cobre), pasándolas por un determinado tamaño de rejilla del tamiz, quedando retenidos la parte más gruesa en la superficie de la misma. Ya que, las capas de cobre y aluminio son maleables y tienden a enroscarse en lugar de ser trituradas, permaneciendo en tamices más grandes (> 300 µm)³⁷.

e) Separación densimetría: tiene como objetivo eliminar los plásticos³⁸, se hace en base a la diferencia de densidad de los mismos. Esto se puede conseguir por medio de una mesa densimétrica vibrante o haciendo pasar la corriente de material por flujos de aire.

f) Separación por corriente de Foucault: Este método se emplea para separar los materiales no férricos (cobre y aluminio), del resto. Para lo cual se hacer pasar a una capa fina de la mezcla sobre una cinta transportadora, donde está instalado un rotor de corrientes de Foucault. El cual repele las partículas de cobre y aluminio y atrae y retiene las ferromagnéticas, mientras que las no metálicas no interaccionan y se recogen por separado³⁹.

g) Tratamiento térmico: La composición del material anódico es 100% carbono, por lo que se realiza una calcinación conjunta del ánodo, cátodo de las baterías de ion litio a 500 °C para eliminar el carbono componente principal del ánodo, con el fin de disminuir el

³⁵ (Nowak & Winter, 2015)

³⁶ (Grützke, y otros, 2015)

³⁷ (Zhou, He, Li, & Zhang, 2010)

³⁸ (Pagnanelli, Moscardini, Altimari, Abo Atia, & Toro, 2016)

³⁹ (Smith, Nagel, & Rajamani, 2019)

consumo de ácido. Para lograr esto, se introduce la masa negra en una mufla durante 4 horas obteniéndose como resultado un polvo negro el cual contiene los compuestos metálicos libre de compuestos de carbono⁴⁰.

2.4. Métodos para la recuperación de cobalto de las baterías de ion-litio

Una vez obtenido el material catódico mediante tratamientos físicos anteriormente descritos se lleva a cabo el tratamiento químico. Para esta parte se han desarrollado diversos métodos para la recuperación de cobalto de las baterías de ion-litio, como son la pirometalurgia, hidrometalurgia, electrometalurgia y la biometalurgia⁴¹. Los tres primeros se llevan a cabo mediante procesos físico-químicos, mientras que en el último se adiciona un proceso de microorganismos (proceso biológico). A continuación, mencionamos algunas técnicas:

2.4.1. Proceso pirometalúrgico

Este proceso consiste en recuperar los metales de la batería a través de la utilización de altas temperaturas, donde las baterías se funden, generando una fracción metálica, escoria y una gran cantidad de gases contaminantes⁴² (dióxido de carbono, dióxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles) al ambiente, por lo que debe controlarse muy bien para evitar fugas al entorno.

Este proceso no necesita de un pretratamiento de las baterías (no hay necesidad de descargar ni separar las baterías como se da en el caso de la hidrometalurgia y la biometalurgia) ya que todo se somete a altas temperaturas, es decir, primeramente, se procede a fundir la batería entera con la carcasa, cátodo, ánodo, aglutinante y electrolito. Los plásticos, grafito y demás sustancias orgánicas proveen calor al momento de la combustión. Dado a que estas sustancias se encuentran a altas temperaturas pasan a un estado gaseoso. Los metales que se encuentran en las baterías se reducen en aleaciones de metales. El proceso de pirometalurgia termina en este punto, pero se complementa con un mecanismo hidrometalúrgico con el fin de purificar estas aleaciones de metales mediante la lixiviación con ácidos.

2.4.2. Proceso biohidrometalúrgico

Este método, de origen biológico es muy prometedor y puede ser una alternativa debido a la eficiencia y disminución de costos de la hidrometalurgia. Utiliza el proceso metabólico de hongos y bacterias para lograr lixiviar elementos como el Co y el Li, donde se han hecho

⁴⁰ (Miao, Hynan, Jouanne, & Yokochi, 2019)

⁴¹ (Huang, Pan, Su, & An, Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives, 2018)

⁴² (Parga & Carrillo)

investigaciones de este último a escala laboratorio, consiguiendo recuperaciones significativas de cobalto, algunas incluso en un rango de 95-100%⁴³.

La biometalurgia es similar a la hidrometalurgia con la diferencia que los ácidos orgánicos e inorgánicos provienen de microorganismos. Esta producción de ácidos promueve la lixiviación de los metales bajo un previo pretratamiento de las bacterias. Para la biolixiviación de cobalto y otros metales a partir de las baterías ion-litio, se han utilizado varias bacterias acidófilas resultando frecuente el uso de *Acidithiobacillus ferrooxidans*⁴⁴. Así mismo, se han usado hongos cuyas actividades fúngicas propician la lixiviación metálica, así como *Aspergillus niger*, *Penicillium simplicissimum*, *Penicillium chrysogenum*, etc⁴⁵.

Comparado con la pirometalurgia e hidrometalurgia, este proceso tiene ventajas y desventajas. Las principales desventajas son el tiempo del proceso de lixiviación, por ejemplo, en el caso de las *Acidithiobacillus thiooxidans* puede tomar de 6 a 10 días. Otra gran desventaja es que las concentraciones de metales para ser lixiviados deben ser menores comparadas a las de los otros procesos. El principal problema es que, al trabajar con microorganismos, estos son difícil de cultivar y mantener por lo que deben ser constantemente monitoreadas para que los microorganismos puedan sobrevivir y cumplir su función como biolixivantes. Así mismo como la hidrometalurgia, el impacto en el ambiente es en el agua residual, ya que estos microorganismos al producir ácidos cambian el pH del agua causando que esta se contamine⁴⁶.

2.4.3. Proceso hidrometalúrgico

La hidrometalurgia es la rama de la metalurgia que cubre la extracción y recuperación de metales, utilizando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas, donde los iones metálicos son separados de la matriz mineral formando complejos estables dentro de la solución, para su posterior recuperación por métodos físicos o químicos. Una de las principales etapas de la hidrometalurgia es la lixiviación, en la cual se extrae un sólido (metal) mediante el uso de un solvente líquido que contiene por lo menos un agente lixivante.

Diversos estudios han demostrado que es altamente viable, por su alta recuperación de metales con una elevada pureza, bajos requerimientos energéticos en comparación con la pirometalúrgica⁴⁷, y poca emisión de gases.

⁴³ (Zeng, Luo, Deng, Li, & Au, 2013)

⁴⁴ (Zeng, Deng, Luo, Luo, & Zou, 2012)

⁴⁵ (Horeh, Mousavi, & Shojaosadati, 2016)

⁴⁶ (Zheng, y otros, 2018)

⁴⁷ (Huang, Pan, Su, & An, Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives, 2018)

Los procesos hidrometalúrgicos involucran soluciones acuosas en las cuales los valores metálicos son lixiviados a partir de minerales, y luego precipitados como metales después que las soluciones hayan sido purificadas. Las etapas directamente concernientes a la separación del metal valioso de los otros metales y de las impurezas del mineral tienen que ver además con procesos de óxido-reducción. La físico-química está relacionada a la interacción entre soluciones y los sólidos. Las reacciones químicas que se efectúan en los procesos hidrometalúrgicos están gobernadas por dos factores:

Factores termodinámicos: donde se consideran las condiciones de equilibrio y marcha a partir de las condiciones del proceso. Los factores termodinámicos son utilizados para predecir cómo va a cambiar el equilibrio de un sistema cuando se varía la temperatura, presión, pH concentración, etc.

Factores cinéticos: donde se considera la velocidad de reacción y los mecanismos de la reacción, mediante los cuales la solución y los sólidos se acercan al equilibrio. Son los que determinan, si se puede efectuar, las reacciones, particularmente de la lixiviación, aun cuando sean posibles o favorables desde el punto de vista termodinámico. La lixiviación y precipitación involucran reacciones heterogéneas, las cuales ocurren en la fase sólido-líquido.

La velocidad de reacción depende del tamaño de las partículas, concentración, temperatura y grado de agitación. Es conveniente estudiar los equilibrios solución-sólido en términos de diagramas potencial-pH que muestran las relaciones de equilibrio para sistemas acuosos determinados por cálculos termodinámicos para las reacciones de hidrólisis y reacciones óxido-reducción para describir sistemas hidrometalúrgicos⁴⁸.

2.5. Lixiviación

La lixiviación es fundamental en un proceso hidrometalúrgico, que involucra la disolución del metal a recuperar desde una materia prima sólida (material catódico), en un disolvente líquido (ácido) mediante la acción de un agente lixivante inorgánico. La transferencia del metal hacia la fase líquida, permite la separación del metal contenido en la fase sólida de sus acompañantes no solubles.

La eficiencia de este proceso será de acuerdo al solvente químico utilizado, normalmente, el más utilizado es el ácido sulfúrico que reacciona con todos los metales. además de su disponibilidad, bajo costo y bajo impacto ambiental en comparación con otros ácidos (nitríco y clorhídrico), y es utilizado en la lixiviación en reactores por agitación⁴⁹. La rentabilidad de

⁴⁸ (Gómez & Ricse Chamorro, 2013)

⁴⁹ (Guevara Coronado, Andrés Mauricio; Vargas Pérez, Stefanny, 2019)

esta operación va estar determinada por el consumo de ácido sulfúrico y el grado de extracción del cobalto. El uso de agentes reductores principalmente el peróxido de hidrogeno donde su efecto lo tiene principalmente en el cobalto y manganeso. Debido a su alto estado de valencia permite la reducción de estos metales en formas solubles Co^{+2} y Mn^{+2} ⁵⁰.

Existen varios métodos de lixiviación que pueden aplicarse de forma muy eficiente, pero en el presente trabajo, el método de interés será enfocado hacia la lixiviación por agitación, que es uno de los métodos más utilizados industrialmente.

2.5.1. Lixiviación por agitación (lixiviación dinámica)

La lixiviación por agitación en reactores, es la disolución del material catódico, la cual es mantenida en suspensión por agitación mecánica, para lo cual requiere que el material haya sido sometido a molienda, aumentando el área de contacto entre la superficie y la solución lixivante. La agitación disminuye el espesor de la capa límite y aumenta el área de contacto. Con la agitación se logra tres objetivos:

- Dispersar los sólidos en un líquido para producir uniformidad.
- Dispersar burbujas de gas en la solución.
- Incrementar la transferencia de masa entre las partículas y la solución de lixiviación.

Se utiliza preferentemente para minerales no porosos o que produzcan muchos finos y especialmente en la disolución de especies que requieren drásticas condiciones de operación. Se aplica a minerales de leyes altas, que justifican la molienda, o bien a concentrados o calcinas de tostación, que por sus menores volúmenes permiten justificar el gasto de una agitación, a cambio de una mayor recuperación y de un menor tiempo de proceso.

La lixiviación por agitación se practica en tanques cilíndricos de metal, fibra de vidrio, madera y acero inoxidable, recubiertos con gaulcho, resinas epóxicas u otros materiales para evitar la corrosión. El fondo de los estanques puede ser plano o cónico, siendo este último tipo más ventajoso, por cuanto ayuda a que todas las partículas permanezcan en suspensión. Para evitar esta sedimentación y a su vez evitar el efecto del vórtice, se instalan deflectores o baffles en la parte interior del reactor, siendo su número generalmente de 4 a 6.

Con respecto a la agitación, esta se logra de dos maneras:

- Mecánica: por hélices, paletas o turbinas.
- Neumática: por air-lift o sistemas Pachuca (reactores).

2.5.2. Parámetros de la lixiviación

Los parámetros con mayor influencia durante la lixiviación:

⁵⁰ (Zheng, y otros, 2018)

Concentración del agente lixivante: la concentración del agente lixivante influye sobre la recuperación de un metal mediante lixiviación por agitación. Para la recuperación de cobalto de las baterías de ion litio, los agentes lixiviantes más empleados son los ácidos inorgánicos (H_2SO_4 , HNO_3 y HCl), ácidos orgánicos (ácido cítrico, ácido oxálico, ácido ascórbico, etc) y las bases (hidróxido de sodio e hidróxido de amonio).

Temperatura: es una variable que afecta la tasa de lixiviación y que muchas veces es un factor difícil de controlar, especialmente cuando se manejan temperaturas elevadas ($60\text{ }^\circ\text{C}$ a $100\text{ }^\circ\text{C}$). Un aumento de la temperatura provoca un aumento en la solubilidad del soluto produciendo también la disolución de compuestos indeseables.

Relación sólido-líquido (ratio S/L): la relación sólido-líquido de la reacción es un parámetro muy importante para el proceso de recuperación de metales, ya que hace referencia a la cantidad de material catódico que requiere por 1 litro de solución acida en la lixiviación. En el caso de haber muchos sólidos la lixiviación tiene un efecto negativo, por lo que el volumen del agente lixivante debe ser mucho mayor que el peso del sólido para que la tasa de recuperación aumente.

Tiempo de lixiviación o el tiempo de residencia: el tiempo es un parámetro importante que a mayor tiempo se logra mayor recuperación del metal. sin embargo, un menor tiempo en el proceso implica, a escala industrial, mayor capacidad de procesamiento. Se establece que un proceso que dure más de 120 minutos se clasifica como altamente compleja, entre 90 y 120 minutos se clasifica como compleja, entre 30 y 90 minutos medianamente simple y con tiempos menores a 30 minutos, se tiene una operación clasificada como simple⁵¹.

Agitación: la agitación es un parámetro influyente en la reacción ya que permite un mejor contacto entre el cátodo y las sustancias involucradas, aumentando la tasa de lixiviación. Una velocidad de agitación alta implica el aumento de costos de operación, es decir que por encima de 1000 rpm se tiene una operación altamente compleja, en cambio para velocidades por debajo de 200 rpm se tiene una operación con condiciones simples y sencillas de controlar.

Tamaño de la partícula: al tener un tamaño de partícula del sólido más pequeño la tasa de lixiviación aumenta, aunque las partículas muy finas son difíciles de asentar y filtrar.

2.6. Separación y purificación del metal lixiviado

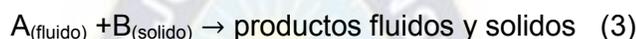
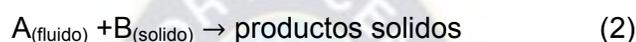
El objetivo de este proceso es la recuperación del metal que se encuentra en el lixiviado obtenido anteriormente con un disolvente mediante distintas técnicas, como la extracción por disolvente, la precipitación selectiva, el método electroquímico o las resinas de intercambio

⁵¹ (Guevara Coronado & Vargas Pérez, 2019)

iónico. Estos compuestos pueden recuperarse como elemento puro, óxido, sulfato o carbonato. Asimismo, es posible realizar directamente precursores metálicos para la posterior fabricación de nuevos electrodos de baterías u otras aplicaciones de interés⁵².

2.7. Reacciones fluido-sólido

En hidrometalurgia se encuentran frecuentemente reacciones del tipo sólido-líquido, tratándose en consecuencia de reacciones heterogéneas no catalíticas, donde es importante conocer los mecanismos controlantes de la cinética de cierto proceso más o menos complejos. A escala laboratorio se desarrollaron las expresiones cinéticas para las reacciones partícula sólida-fluido. Estas reacciones pueden representarse por:



2.7.1. Cinética de la lixiviación del cobalto

Para reacciones no catalíticas entre la partícula sólida y el fluido que la rodea se consideran dos modelos simples idealizados: el modelo del núcleo que se escoge sin reaccionar y el de conversión progresiva. Siendo el modelo del núcleo que se escoge sin reaccionar el que describe de mejor manera lo que ocurre durante una lixiviación y las reacciones de disolución del metal, considerando principalmente tres etapas; la transferencia de masa a la capa de la partícula, reacción química superficial y difusión de los productos de la capa residual.

Para las reacciones no catalíticas que describen las reacciones heterogéneas de partículas sólidas con el fluido que las rodea, se utilizó el modelo de núcleo que se escoge sin reaccionar, el cual se ajusta mejor al comportamiento real de las partículas durante una lixiviación y las reacciones de disolución del metal. A continuación, se realiza una deducción del modelo que se escogió a escala laboratorio.

2.7.2. Modelo de núcleo que se escoge sin reaccionar

Nuestro modelo procede de acuerdo con el modelo del núcleo que se escoge sin reaccionar, con control por la reacción química, tal como se expresa en el trabajo realizado a escala laboratorio. Este modelo es la mejor representación para sistemas de reacción sólido-fluido, ya que, se ajusta mejor al comportamiento real de las partículas⁵³.

En este modelo se considera que la reacción se produce primero en la superficie exterior de la partícula, formándose una “zona superficial” de reacción, desplazándose hacia el

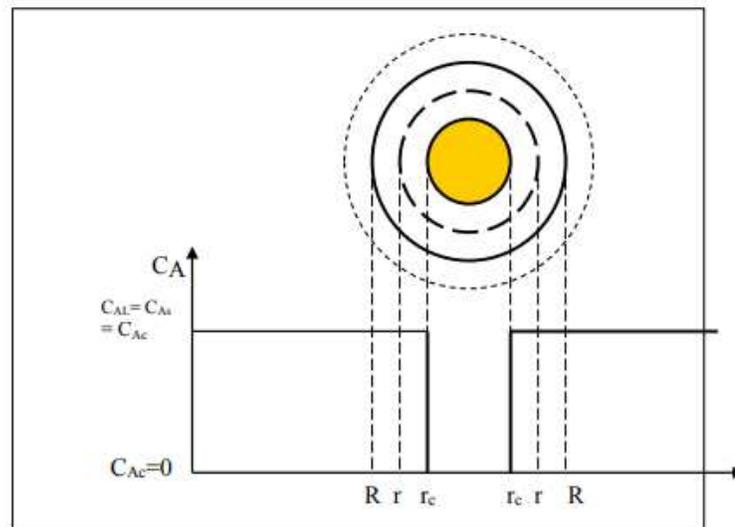
⁵² (Liu, Lin, Cao, Zhang, & Sun, 2019)

⁵³ (Levenspiel, 2004)

interior de la partícula sólida, dejando tras de sí material completamente convertido y sólido inerte (ceniza) hasta la superficie del núcleo que no ha reaccionado. Así, en cualquier instante existe un núcleo de material sin reaccionar que se escoge durante la reacción como se muestra en la figura de abajo.

2.7.3. Control por la reacción química

Figura 1 Control químico.



Fuente: (Mamani Huanca, 2018)

La ordenada del gráfico corresponde a la concentración del reactivo sólido en la fase líquida y al interior de la partícula; la abscisa corresponde a la posición radial de la partícula esférica.

En la figura se muestra los gradientes de concentración dentro de una partícula cuando la etapa controlante es la reacción química. Puesto que el progreso de la reacción no se ve afectado por la presencia de alguna capa de ceniza, la velocidad es proporcional a la superficie del núcleo sin reaccionar. Por tanto, la velocidad de reacción, basada en la unidad de superficie del núcleo sin reaccionar, r_c , para la estequiometría de las ecuaciones 1, 2 y 3 es:

$$-\frac{1}{4\pi r_c^2} \frac{dN_A}{dt} = -\frac{b}{4\pi r_c^2} \frac{dN_A}{dt} = bK_s C_{AL} \quad (4)$$

Donde K_s constante cinética de primer orden para la reacción superficial. Escribiendo N_B en función del radio decreciente del núcleo, dado por la siguiente ecuación:

$$-dN_B = -b dN_A = -\rho_B dV = -\rho_B d\left(\frac{4}{3}\pi r_c^3\right) = -4\pi \rho_B r_c^2 dr_c \quad (5)$$

En este caso la velocidad de reacción es proporcional al tamaño de la superficie del núcleo no reaccionado:

$$-bdN_A = -dN_B = -4\pi r_c^2 \rho_B dr_c \quad (6)$$

Sustituyendo la ecuación (6) en la (4) se tiene:

$$-\frac{1}{4\pi r_c^2} \rho_B 4\pi r_c^2 \frac{dr_c}{dt} = -\rho_B \frac{dr_c}{dt} = bK_s C_{AL} \quad (7)$$

Integrando:

$$-\rho_B \int_R^{r_c} dr_c = bK_s C_{AL} \int_0^t dt \quad (8)$$

O bien:

$$t = \frac{\rho_B}{bK_s C_{AL}} (R - r_c) \quad (9)$$

El tiempo τ que se requiere para la eficiencia de lixiviación completa se obtiene cuando lixiviar toda la partícula ($r_c = 0$), es:

$$\tau = \frac{\rho_B R}{bK_s C_{AL}} \quad (10)$$

Incorporando la expresión de τ en la ecuación (9) y reordenando se tiene:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \frac{r_c}{R} \quad (11)$$

la razón r_c/R se puede relacionar con el grado de eficiencia de lixiviación X_B , o sea la fracción de B que ha sido lixiviada, mediante la expresión:

$$1 - X_{Co} = \frac{\frac{4}{3} \pi r_c^3 (\text{vol. núcleo. sin. reaccionar})}{\frac{4}{3} \pi R^3 (\text{vol. partícula. total})} = \left(\frac{r_c}{R}\right)^3 \quad (12)$$

Finalmente, despejando r_c/R y reemplazando en la ecuación (11) se llega a:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_{Co})^{1/3} \quad (13)$$

$$tk = 1 - (1 - X_{Co})^{1/3} \quad (14)$$

Donde:

t = tiempo de lixiviación

τ = tiempo de lixiviación total del sólido

X_{Co} = eficiencia de lixiviación del cobalto

R = radio externo de la partícula de tamaño fijo

ρ_{Co} = densidad de partícula

b = coeficiente estequiométrico de la fase sólida

C_{AL} = concentración del reactivo en la fase líquida

K_s = constante cinética de primer orden para la reacción superficial

k = constante de velocidad cinética el cual depende de la temperatura

2.8. Reactor

Un reactor químico es una unidad de proceso diseñada para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones químicas o procesos en los que unos “reactivos” se convierten en “productos”. Se definen tres tipos de reactores, combinando el modo de operación y los modelos ideales de flujo:

- Reactor discontinuo: recipiente agitado en el que se introducen los reactivos, y durante el tiempo de operación, no entra ni sale ningún flujo de materia del reactor.
- Reactor tipo tanque agitado: se encuentran los que operan en forma batch y en modo continuo. A gran escala normalmente se realizan en operación continua, en la cual se busca obtener una alta productividad. Estos reactores son diseñados para operar en grandes periodos de tiempo sin tener que parar su operación.
- Reactor tubular: normalmente son cilindros alargados por el que circula la masa del fluido reaccionante de un extremo a otro sin mezclarse, empleados en operaciones continuas. Los reactores de flujo pistón (PFR) son usados comúnmente en gases y cuando se realizan reacciones que requieran un catalizador heterogéneo.

Las funciones de un reactor para que se lleven a cabo las reacciones químicas de un modo apropiado pueden resumirse en tres:

- Proporcionar el tiempo de contacto necesario entre los reactivos, denominada tiempo de residencia; su conocimiento es determinante en el tamaño del reactor para una producción y eficiencia de lixiviación o conversión dadas.
- Facilitar la mezcla de las fases presentes en la reacción con ayuda de un agitador.
- Suministrar o eliminar calor al sistema y permitir las condiciones de presión y temperatura; la termodinámica nos proporciona la información necesaria respecto a la energía absorbida o desprendida durante la reacción, magnitud que debe conocerse para efectuar el diseño adecuado.

Los diferentes tipos de reactores ideales pueden ser aplicados tanto para reacciones homogéneas (una sola fase) como heterogéneas (intervienen más de una fase) catalizadas y no catalizadas. Una vez que la información en la cinética de la reacción es conocida, es posible predecir la eficiencia de lixiviación total de la reacción en un reactor dado⁵⁴. Por lo

⁵⁴ (Uceda Herrera, 2016)

que las reglas para un funcionamiento correcto en un reactor ideal homogéneo pueden ser aplicadas a menudo directamente a sistemas heterogéneos⁵⁵.

En este proyecto se hará uso de un reactor batch ya que su principal ventaja es la alta eficiencia de lixiviación, debido a que basta con permitir que los reactivos permanezcan por tiempos prolongados al interior del reactor para conseguir una alta eficiencia de lixiviación. Además, del bajo costo que tiene la implementación de este tipo de reactores y que presentan la facilidad de ser escalados directamente de ensayos que se han realizado a escala de laboratorio.

2.8.1. Volumen del reactor

el volumen del reactor, es el volumen necesario para que una reacción se lleve a cabo, este varía dependiendo del tipo de reactor y de la reacción que se esté llevando a cabo. Es importante no confundir el volumen de reacción con el volumen del reactor; el volumen de reacción es el volumen necesario para que una reacción se efectúe, mientras que el volumen del reactor es el volumen que posee el reactor tomando en cuenta un factor de seguridad y otras adiciones que se puedan dar al momento de realizar el dimensionamiento del reactor.

2.8.2. Cinética Química

Es el estudio de las velocidades de reacciones químicas y los mecanismos de reacción, es decir, es la encargada de estudiar que tan rápido se efectúa una transformación química. En el estudio de la ingeniería de las reacciones químicas, se junta el estudio de la cinética química con los reactores en los cuales se llevan a cabo dichas reacciones⁵⁶.

2.8.3. Velocidad de reacción y orden de reacción

Se define como la velocidad de desaparición o formación de reactivos en productos por unidad de tiempo o por unidad de volumen. Se puede expresar de varias formas, a veces, conviene medir la eficiencia de lixiviación " X " de un producto de reacción a diversos tiempos.

Para realizar el cálculo de velocidad de reacción hay que tomar en cuenta la constante de velocidad de reacción (k), y también hay que saber que esta constante varía dependiendo de la temperatura en la cual se da la reacción. Y el orden de reacción se refiere a las potencias que las concentraciones se elevan en la ley de velocidad cinética, por lo que la rapidez de reacción es proporcional a las concentraciones de los reactantes elevadas a una potencia en las reacciones heterogéneas la constante de velocidad de reacción es de orden 1.

⁵⁵ (Levenspiel, 2004)

⁵⁶ (Fogler, Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas, 2008)

2.8.4. Constante de velocidad de reacción

La constante de velocidad de reacción k es independiente de las concentraciones de las especies que interactúan en la reacción, para el material aquí presentado se asumirá que solo depende de la temperatura. Esta suposición es válida en la mayoría de las reacciones de laboratorio e industriales⁵⁷.

2.8.5. Tiempo de residencia

Es el tiempo necesario para que se dé una reacción con cierto grado de eficiencia de lixiviación en el reactor⁵⁸. Para realizar un estudio cinético se puede medir ciertos parámetros, como la concentración de reactivos cada cierto tiempo, no solamente la concentración inicial (concentración conocida) y la concentración final.

Como variables determinantes del diseño de equipos, que afectan a la velocidad de reacción, son: la temperatura y la agitación. La temperatura afecta directamente a una velocidad de reacción cuando son endotérmicas o exotérmicas.

2.9. Agitador

El agitador permite mantener en suspensión partículas sólidas en el líquido. Teniendo tres principales tipos de agitadores los cuales son de paletas, hélices y turbinas. Si bien existen otros tipos, los mencionados solucionan entre un 95 y 100% de todos los problemas de agitación.

Agitadores de paletas: Por lo general son agitadores de palas planas que giran sobre un eje vertical y cumplen eficazmente problemas sencillos de agitación. Son frecuentes los agitadores de dos y cuatro palas. Los agitadores de palas giran a velocidades comprendidas entre 20 y 150 rpm aproximadamente.

Agitadores de hélice: El flujo de un agitador de hélice es axial, trabaja a altas velocidades y se utiliza para líquidos de baja viscosidad. Las hélices pequeñas pueden girar utilizando transmisión directa a una velocidad que varía entre 1150 y 1750 rpm; las hélices grandes pueden girar entre 400 y 800 rpm.

Agitadores de turbina: El agitador se compone generalmente de numerosas palas cortas, las que giran a medias y altas velocidades sobre un eje montado centralmente en el estanque. Se consideran velocidades medias de 100 a 300 rpm y elevadas de 300 a 1000 rpm. El diámetro puede variar entre un 30 y un 50 % del diámetro del estanque. Los de turbina son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades. Las corrientes principales son

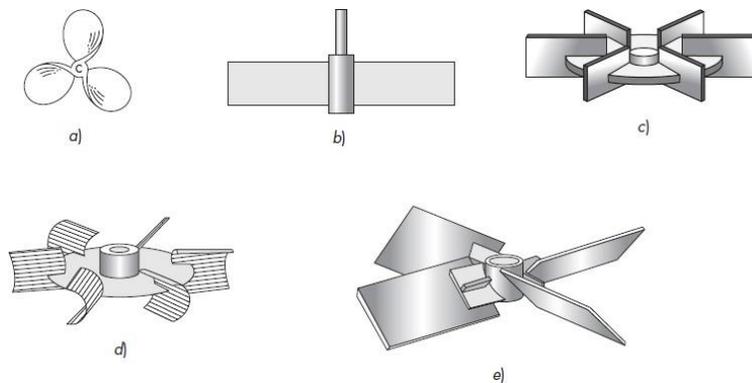
⁵⁷ (Solís Ulloa, 2017)

⁵⁸ (Fogler, Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas, 2008)

radiales y tangenciales. Los componentes tangenciales dan lugar a la formación de vórtices y remolinos, los que se evitan utilizando placas deflectoras.

Con el fin de mejorar el proceso de lixiviación, en el presente trabajo se propone utilizar un agitador tipo turbina para incrementar el contacto entre el material catódico y la solución lixivante⁵⁹.

Figura 2 Tipos de Agitadores para viscosidades moderadas

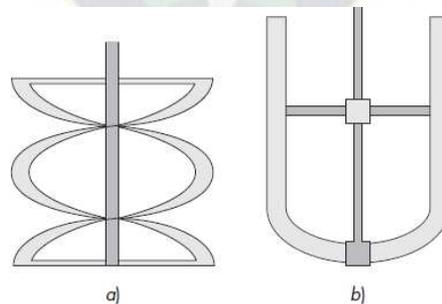


a) agitador marino de tres palas; b) turbina simple de pala recta; c) turbina de disco; d) agitador de pala cóncava; e) turbina de pala inclinada.

Fuente: (McCabe, Smith, & Harriott, 2007)

Para una agitación de líquidos de alta viscosidad se usan comúnmente los siguientes agitadores:

Figura 3 Tipos de Agitadores para alta viscosidad



a) agitador de cinta de doble trayectoria helicoidal; b) agitador de ancla.

Fuente:(McCabe, Smith, & Harriott, 2007)

2.9.1. Flujos axial, radial y tangencial

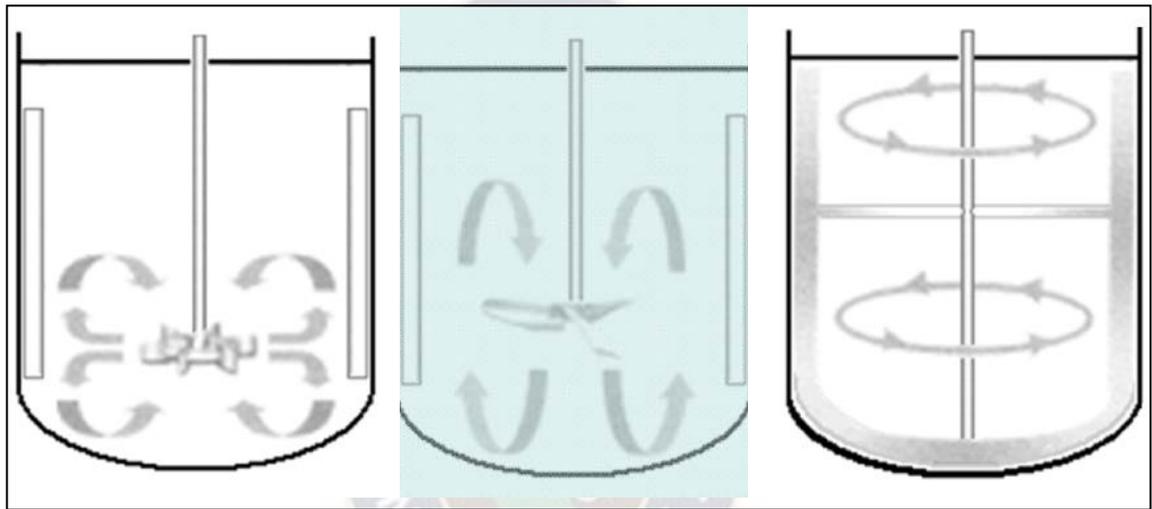
El tipo de flujo que se produce en el interior de un reactor en agitación, va depender del tipo de agitador, de las características del fluido, del tamaño, proporciones del reactor, y si

⁵⁹ (Juárez Mata)

lleva o no placas deflectoras. La velocidad del fluido en cualquier punto del reactor tiene tres componentes, y el tipo de flujo predominante va a depender de las variaciones del movimiento y de la velocidad de estas.

La primera componente de velocidad es radial y actúa en dirección perpendicular al eje del agitador, la segunda es longitudinal o axial y actúa en dirección paralela al eje. La tercera es tangencial o rotacional, y actúa en dirección tangencial a la trayectoria circular descrita por el agitador.

Figura 4 Representación de flujos: Radial, axial y tangencial



Fuente: (Castillo Uribe, 2013)

2.10. Escalamiento

El concepto de escalamiento parte de la definición de medición, en el cual se desarrollan los criterios y las reglas de asignación de números que determinan las unidades de medida significativas para definir un sistema grande a partir de uno pequeño. Por lo que a través de una técnica de diseño adecuada de escalamiento se pueda definir un proceso a nivel bench⁶⁰.

El escalamiento es una parte esencial de este trabajo, ya que se busca establecer los parámetros para poder realizar la lixiviación del cobalto a una escala a nivel bench a partir de una escala a nivel laboratorio de donde se obtendrá los datos de diseño necesarios para el escalamiento.

⁶⁰ (González Castellanos, 2018)

Figura 5 proceso de escalado



Fuente: elaboración propia

2.10.1. Laboratorio

Escala cuya función principal es la comprobación de la información teórica, así como una fuente de obtención de datos para la formulación de modelos matemáticos y que formara la base para el trabajo a escala bench. Finalmente, permite evaluar de manera eficiente los efectos que tienen las diferentes variables de perturbación sobre el proceso.

2.10.2. Bench (Banco)

Adquiere un carácter más tecnológico. Al contrario que a escala laboratorio, posee equipos cuya geometría es parecida a la de la escala industrial, y conlleva mayor nivel de instrumentación y automatización. En esta escala principalmente se confirman los modelos matemáticos fruto de las etapas de laboratorio donde se precisa y amplía la información obtenida de laboratorio, la cual repercutirá en la decisión de llevar a cabo o no a una la escala superior.

2.11. Aspectos importantes del escalado

Antes de entrar más profundamente al método de escalado y los cálculos a llevar a cabo, conviene pararse a describir algunos conceptos que serán fundamentales y que ayudarán a entender mejor los pasos que se seguirán más adelante en el escalado del proceso.

El escalamiento no es un método de simulación, es decir, no predice como se va comportar la reacción en el tiempo, sino más bien nos dice qué tipo de condiciones, que tipo de características tiene que tener el sistema de mayor escala a partir de la información que obtengamos del proceso a escala laboratorio.

Por esa razón es importante no confundir un proceso de escalamiento con un proceso de simulación, ya que el escalamiento solo nos permite determinar la configuración física del sistema, es decir, cuán grande va ser, que dimensiones tiene que tener, la agitación, que

potencia va usar, que características va tener para el calentamiento o enfriamiento del sistema, etc.

Por lo que en el presente documento se establecerá una relación de escala, que no es más que la relación de tamaños o magnitudes entre la escala más grande a la que se quiere pasar y la magnitud de la escala pequeña.

2.12. Principios de similitud

El escalado se fundamenta en el llamado principio de semejanza o similitud. El principio hace referencia a la relación que existe entre dos o más sistemas físicos y el tamaño de los mismos, siendo básico en el escalamiento de procesos físicos y químicos. Los sistemas físicos se caracterizan en general por tres cualidades: tamaño, forma y composición. Las tres variables son independientes; por ejemplo, dos objetos pueden ser diferentes en tamaño, pero tener la misma forma y composición. La similitud puede ser geométrica, mecánica, térmica y química.

Geométrica: La similitud geométrica existe cuando entre dos sistemas, la relación de sus dimensiones significantes son las mismas para cada sistema. Cuando no es necesario que la relación de escalamiento sea la misma en cada uno de los ejes, se denomina similitud distorsionada.

Mecánica: La similitud mecánica comprende en su área a las similitudes estática, cinemática y dinámica. Cada una de éstas puede considerarse como una extensión del concepto de similitud geométrica en sistemas fijos o en movimiento sujetos a fuerzas externas o internas.

Estática: La similitud estática se presenta en los cuerpos sólidos sujetos a esfuerzos constantes y se define como: "Cuerpos geoméricamente similares, son también estáticamente similares cuando al estar sujetos a esfuerzos constantes sus deformaciones relativas son tales que permanecen geoméricamente similares"; por lo que la relación de los desplazamientos correspondientes será igual a la relación de escala.

Cinemática: Tiene aplicación para sólidos o fluidos en movimiento, cuando partículas correspondientes trazan trayectorias geométricas correspondientes en intervalos de tiempo similares.

Dinámica: "Sistemas en movimiento con similitud geométrica y cinemática son dinámicamente similares cuando las relaciones de todas las fuerzas correspondientes son iguales.

Térmica: Esta similaridad involucra a los sistemas en los cuales se presenta flujo de calor por lo que se introduce la dimensión de temperatura además de la longitud, masa y tiempo.

Los sistemas que presentan similitud geométrica son térmicamente similares cuando la diferencia de temperatura conserva una relación constante entre ellos y la semejanza térmica requiere de la semejanza cinemática.

Química: (similitud dimensional aplicada a reacciones químicas), este tipo de similitud se relaciona con sistemas que presentan reacciones químicas donde la composición varía de un punto a otro, ya sea en procesos discontinuos o continuos, en diferentes instantes. En este caso no se introducen nuevas dimensiones y no es necesario que las composiciones químicas de ambos sistemas sean las mismas, solamente que exista una relación fija entre las concentraciones puntuales de los componentes comparados. De esta manera se observa la semejanza química depende de la cinética y de la térmica.

2.13. Método de escalado

Como hay una gran diversidad en los procesos cuya escala se debe aumentar, no hay un solo método que pueda manejar todos los tipos de problema de aumento de escala, y hay muchas maneras de realizarlo. Para el escalado del presente estudio se realizará con base en la perspectiva del análisis dimensional y en la semejanza geométrica, es decir, escalar por similitud se apoya en los grupos adimensionales y busca que, manteniendo el mayor número de similitudes, la relación de números adimensionales pueda aplicarse sin ponderadores (sin sacrificio de números adimensionales). La idea que subyace puede expresarse de la manera siguiente: “Si dos sistemas están descritos con las mismas ecuaciones diferenciales, con las mismas ecuaciones de contorno y con los mismos parámetros de operación, entonces ambos sistemas se deben comportar de manera idéntica”⁶¹.

2.13.1. Aumento de escala de los agitadores

Si bien la semejanza geométrica es importante, y la más fácil de lograr. La semejanza cinemática puede definirse en términos de razones de velocidades o de tiempos. La semejanza dinámica requiere proporciones fijas de fuerzas viscosas, inerciales o gravitatorias. Aun si se logra la semejanza geométrica, la semejanza dinámica y cinemática no siempre se pueden obtener al mismo tiempo⁶².

En muchos casos, los objetivos principales que se presentan en un proceso de agitación son los siguientes: igual movimiento de líquidos, como en la mezcla de líquidos, donde el movimiento o velocidad correspondiente de los líquidos es aproximadamente igual en ambos casos; igual suspensión de sólidos, donde los niveles de suspensión son iguales; e iguales

⁶¹ (Geankoplis, 1998)

⁶² (Geankoplis, 1998)

tasas de transferencia de masa, donde la transferencia de masa ocurre entre una fase líquida y una sólida y las tasas son iguales.

2.14. Análisis dimensional

El método de correlacionar cierto número de variables, en una sola ecuación, expresando un efecto, se conoce como análisis dimensional, que es sencillamente un instrumento matemático. Las ecuaciones se pueden representar por medio de números adimensionales ya establecidos, reduciendo el número de variables. Se puede expresar una dimensión dependiente en función de un conjunto seleccionado de dimensiones básicas independientes, utilizando el sistema internacional de unidades, están son:

- L – longitud
- M – masa
- T – tiempo

La manera de relacionar estos grupos adimensionales y las variables que afectan a un fenómeno físico en cuestión, está basada en el teorema de Buckingham (más conocido como teorema (π)). Estos parámetros adimensionales se obtienen mediante combinaciones adecuadas de los parámetros dimensionales y no son únicos, aunque sí lo es el número mínimo necesario para estudiar cada sistema. De este modo, al obtener uno de estos conjuntos de tamaño mínimo se consigue:

- Analizar con mayor facilidad el sistema objeto de estudio y
- Reducir drásticamente el número de ensayos que debe realizarse para averiguar el comportamiento o respuesta de un sistema determinado.

A continuación, se presenta el Teorema de Pi (π) De Buckingham el cual permite obtener números adimensionales a partir de un conjunto de variables asociadas a un problema particular:

2.14.1. Teorema PI “ π ” de BUCKINGHAM.

Este teorema es esencial en el análisis dimensional, ya que establece que en un problema físico en que se tengan n cantidades en las cuales hay m dimensiones independientes, las cantidades pueden reordenarse en $n-m$ parámetros adimensionales independientes. Sean $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ las cantidades involucradas, se debe tener una función que las relaciones:

$$f(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = 0 \quad (15)$$

Si π_1, π_2, \dots , representan agrupamientos adimensionales de las cantidades A_1, A_2, A_3, \dots , entonces con las m dimensiones involucradas, la ecuación sería:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (16)$$

El método para determinar los parámetros " π " consiste en seleccionar m de las A cantidades, con diferentes dimensiones, que contengan entre ellas las m dimensiones, y utilizarlas como variables repetitivas junto con una de las otras cantidades A para cada " π ". Es esencial que ninguna de las m cantidades seleccionadas para ser utilizadas como variables repetitivas se puedan deducir de otras variables repetitivas. Por ejemplo, sean A_1 , A_2 , A_3 , que contienen M, L y T, no necesariamente cada una de ellas, sino en forma colectiva, entonces el primer parámetro " π " se define como:

$$\pi_1 = A_1^{X_1} A_2^{Y_1} A_3^{Z_1} A_4 \quad (17)$$

El segundo como:

$$\pi_2 = A_1^{X_2} A_2^{Y_2} A_3^{Z_2} A_5 \quad (18)$$

Y así sucesivamente, hasta que

$$\pi_{n-m} = A_1^{X_{n-m}} A_2^{Y_{n-m}} A_3^{Z_{n-m}} A_n \quad (19)$$

En estas ecuaciones se deben determinar los exponentes de tal manera que cada " π " sea adimensional. Las dimensiones de las cantidades A se sustituyen y los exponentes de M, L y T se igualan a cero respectivamente, produciendo tres ecuaciones con tres incógnitas para cada parámetro " π ", de tal manera que se pueden determinar los exponentes x , y , z y, por consiguiente, el parámetro " π ".

Si solamente están involucradas dos dimensiones, entonces se seleccionan dos de las cantidades A como variables repetitivas y se obtienen dos ecuaciones para los exponentes desconocidos, para cada término de " π ".

2.15. Números adimensionales

Un número adimensional es aquel que no tiene unidades físicas que lo especifiquen, y, por lo tanto, es un número puro. Además, se definen como productos o cocientes de cantidades que tienen unidades, de tal forma que todas estas se simplifican. Los números adimensionales característicos de un sistema pueden obtenerse mediante el análisis dimensional y el teorema " π ". de BUCKINGHAM.

CAPITULO

III



3. Marco situacional

3.1. Problemática actual

Basada en contexto a la información nacional como internacional y contextualizando el municipio de La Paz de las LIB's.

3.2. Situación internacional

En el mundo existe la preocupación latente sobre la generación desmesurada de baterías de celular y lo que es aún peor la disposición final de este como residuo, puesto que existen investigaciones sobre los contaminantes tóxicos que contiene en su interior y por ende su impacto en el medio ambiente y la salud.

Por ejemplo, hoy en día países como Argentina y México, con el fin de obtener y recuperar los metales que se encuentran en el material catódico, trabajan en conjunto con Europa, el EBRA (European Battery Recycling Association) la cual es una asociación fundada en 1998 que promueve el desarrollo de la recolección, tratamiento, clasificación y reciclado de pilas y baterías desechadas. La mayoría de sus miembros son las empresas recicladoras de pilas y baterías localizadas en diferentes países de la Unión Europea⁶³. En la siguiente tabla se mencionan algunas de las empresas europeas y el tipo de tecnología aplicada para el reciclado de diferentes pilas y baterías agotadas.⁶⁴

Tabla 2 Algunas Empresas Europeas de reciclado y tratamiento de pilas y baterías

Empresas	País	Tipo de pilas y baterías	Tecnología
Accurec GMBH (www.accurec.de)	Alemania	Baterías Ni-Cd, Ni-MH y pilas alcalinas.	Destilación al vacío
Batrec Industrie AG (www.batrec.ch)	Suiza	Pilas y baterías primarias y secundarias, incluyendo baterías de Litio y pilas botón.	Pirometalúrgico
Citron (www.citron.ch)	Francia	Pilas primarias de Litio, alcalinas y de Carbono/Zinc. Baterías Zinc/aire.	Pirometalúrgico
Duclos Environnement (www.duclos-sa.com)	Francia	Pilas primarias, incluyendo pilas botón.	Destilación al vacío
Erachem Comilog (www.erachem-eur.com)	Bélgica	Todo tipo de pilas y baterías primarias.	Hidrometalúrgico
Euro Dieuze Industrie (www.sarpindustries.fr)	Francia	Pilas y baterías primarias y secundarias.	Hidrometalúrgico
GyP Batteries (www.g-pbatt.co.uk)	Inglaterra	Todo tipo de pilas	Hidrometalúrgico
Pilagest S.L. (www.pilagest.es)	España	Pilas y baterías primarias y secundarias (excepto baterías de plomo), incluyendo pilas botón.	Hidrometalúrgico
SNAM (www.snam.com)	Francia	Baterías Ni-Cd, Ni-MH, lón-Litio.	Destilación

⁶³ <https://www.ebra-recycling.org/>

⁶⁴ <http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/07/Impacto-pilas-2014.pdf> y búsquedas propias

Fuente: <http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/07/Impacto-pilas-2014.pdf> y búsquedas propias

3.2.1. Empresas recuperadoras de Baterías

En la actualidad existen varias compañías dedicadas a la recuperación del contenido de metales de baterías a nivel mundial, las cuales tienen diferentes tipos de procesos para realizar la recuperación de los metales, como los métodos químicos, mecánicos, pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, biometalúrgicos, electrometalúrgicos, ultrasónicos, e incluso la combinación de todos o algunos de ellos. Sin embargo, existen métodos bien conocidos, y actualmente aplicados en la industria como son los procesos Umicore y Toxco, y otros ampliamente aceptados, y que han sido el fundamento de otras investigaciones, como el proceso AEA Technology. A continuación, se describirán brevemente las compañías dedicadas a este tema.

3.2.1.1. Proceso UMICORE

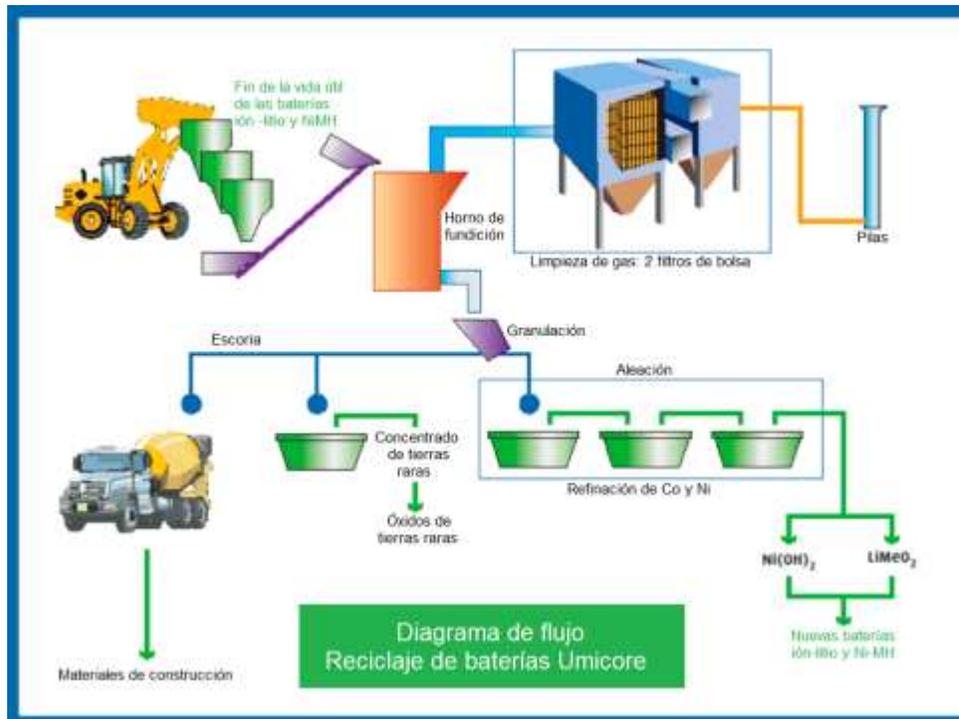
Es una de las compañías más tradicionales en Europa en el área de manejo de metales, con experiencia desde 1837, comprometida con el medio ambiente y dedicada a la recuperación de materiales que se pueden reincorporar a la vida productiva. Umicore lanzó una planta de reciclaje de baterías en Hoboken (Bélgica), que además del tratamiento simultáneo de las baterías de iones de litio y NiMH, es un proceso que puede manejar varios otros tipos de baterías, como las baterías alcalinas primarias. Su proceso se basa en la pirometalurgia por fundición de los materiales y posteriores procesos hidrometalúrgicos para la refinación del Níquel, Cobalto, cobre, cerio, praseodimio, lantano, neodimio entre otros⁶⁵.

En la figura de abajo se muestra un esquema de operación de su planta en la cual se puede apreciar que la primera etapa de recuperación está el proceso térmico en el cual se funden los metales de interés para después ser precipitados mediante procesos hidrometalúrgicos. Estos procesos constan como es de esperarse de unas etapas posteriores para el tratamiento de los gases provenientes del horno⁶⁶.

⁶⁵ (Kwade, Arno; Diekmann, Jan, 2018)

⁶⁶ (Umicore, 2016)

Figura 6 diagrama de flujo reciclaje de baterías Umicore para el aprovechamiento de las baterías ion litio y NiMH



Fuente: (Elwert, y otros, 2016)

3.2.1.2. Proceso TOXCO

Es un proceso mecánico e hidrometalúrgico desarrollado por TOXCO. Antes de ingresar al proceso, las baterías son reducidas mediante enfriamiento criogénico con nitrógeno líquido, lo que hace que el proceso de trituración sea seguro, ya que se evitan los cortocircuitos debido a la congelación del electrolito. Después de enfriarse a aproximadamente -160°C , las celdas se Trituran en trozos pequeños y se alimentan a un separador magnético que elimina la fracción de acero. El material triturado restante se sumerge en una salmuera de litio de pH alto, la cual se recircula desde un paso posterior del proceso⁶⁷.

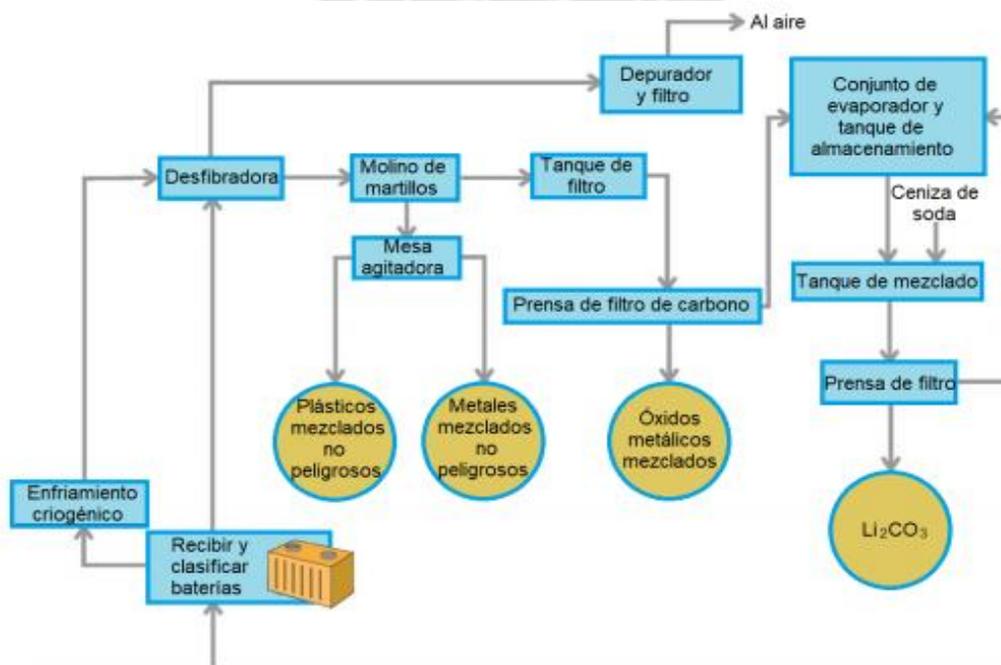
La mezcla líquida de material triturado y salmuera de litio se muele aún más, en húmedo, mediante un molino de hummer para separar los colectores de los materiales activos, que se lavan de la solución. Posteriormente, las partículas trituradas son deshidratadas por una prensa de tornillo, trituradas nuevamente y alimentadas a una mesa agitadora, que separa los metales y los plásticos. La fracción metálica se envía a una mayor separación y

⁶⁷ (Kwade, Arno; Diekmann, Jan, 2018)

reutilización, y la solución de salmuera fría que contiene materiales activos se transfiere a un tanque, en el que se calienta y los materiales activos se neutralizan y se pasan por un filtro-prensa, separando los materiales activos como una mezcla en forma de torta, que no pueden reciclarse en este proceso (sin embargo, este material podría alimentarse al proceso Umicore)⁶⁸.

La solución de salmuera de litio filtrada se transfiere a un tanque aguas abajo, del cual se recircula parcialmente al proceso de trituración anterior o se transfiere a un tanque de mezcla siguiente en el que el litio se precipita como Li_2CO_3 mediante la adición de Na_2CO_3 y el producto insoluble se deshidrata en un filtro prensa adicional. Para una mayor refinación, el Li_2CO_3 se somete a una disolución posterior en ácido sulfúrico. La torta del filtro se coloca en una celda electrolítica híbrida, que se separa en un compartimento ácido y básico mediante una membrana conductora de Li^+ . El compartimento ácido está lleno de ácido sulfúrico suave, mientras que el compartimento básico está lleno de LiOH , si el Li_2CO_3 se disuelve en ácido sulfúrico, los iones Li^+ pueden pasar a través de la membrana mientras los aniones son repelidos. El LiOH se puede usar para ajustar el pH de la solución de proceso de salmuera mencionada en los pasos anteriores. La solución concentrada de LiOH se deshidrata o se convierte en Li_2CO_3 mediante la adición de CO_2 a la solución⁶⁹.

Figura 7 Diagrama de flujo reciclaje de baterías TOXCO



Fuente: (Gaines & Burnham, 2011)

⁶⁸ (Kwade, Arno; Diekmann, Jan, 2018)

⁶⁹ (Kwade, Arno; Diekmann, Jan, 2018)

3.2.1.3. Proceso AEA

Es un proceso mecánico e hidrometalúrgico desarrollado por Michael J. Lain, realizado a temperatura ambiente, se extrae el electrolito de la celda, se hace una disolución de los electrodos y se reduce el cobalto de Co^{3+} a Co^{2+} , mientras se libera el Li de la estructura sólida del electrodo⁷⁰. Esta es la última fase, de un proceso de cuatro etapas.

La primera etapa consiste en una trituración mecánica, en la cual las celdas se colocan en una atmósfera inerte y seca, así se evita exponer el electrolito al vapor de agua, que hidrolizaría el electrolito, también se reduce el impacto que en contacto con el oxígeno puede causar cortocircuitos en las celdas⁷¹.

La segunda etapa consiste en la extracción de los electrolitos. El electrolito líquido se dispersa en los poros de los electrodos y el separador. Sin embargo, al sumergirse en un disolvente adecuado durante unas pocas horas, el electrolito se puede extraer. Después de la separación de los sólidos residuales, el disolvente puede recuperarse por evaporación a presión reducida, dejando el electrolito puro. Se pueden usar varios líquidos como solvente de extracción, los cuales tienen como requisitos principales: que el punto de ebullición a presión reducida esté por debajo de la temperatura de descomposición de la sal de litio ($\approx 80^\circ\text{C}$) y que el material esté disponible en un estado anhidro⁷².

La tercera etapa es la disolución de los electrodos, los cuales se moldean usando el aglutinante PVDF (fluoruro de polivinilideno) dispersado en un disolvente. Este proceso se puede revertir para recuperar las partículas del electrodo. Las piezas de celulares se sumergen en el disolvente, que se agita y se calienta a aproximadamente 508°C . Por su parte, el aglutinante se disuelve, separando las partículas del electrodo del cobre residual, aluminio, acero y plástico. Estos últimos pueden separarse aún más en función de sus propiedades físicas, por ejemplo, densidad, magnetismo; y las partículas del electrodo se filtran de la solución aglutinante, que luego se concentra para recuperar la mayor parte del disolvente para su reutilización⁷³.

La cuarta y última etapa es la reducción de cobalto. Las partículas residuales del electrodo son óxido de litio y cobalto y uno o más tipos de carbono. Antes de que puedan reutilizarse, deben separarse más. Para evitar agregar productos químicos al sistema, se utiliza la reducción electroquímica. A medida que el cobalto (III) se reduce a cobalto (II), el litio se libera de la estructura sólida, y se genera oxígeno en el contraelectrodo. Las

⁷⁰ (An, 2019)

⁷¹ (Lain M. J., 2001)

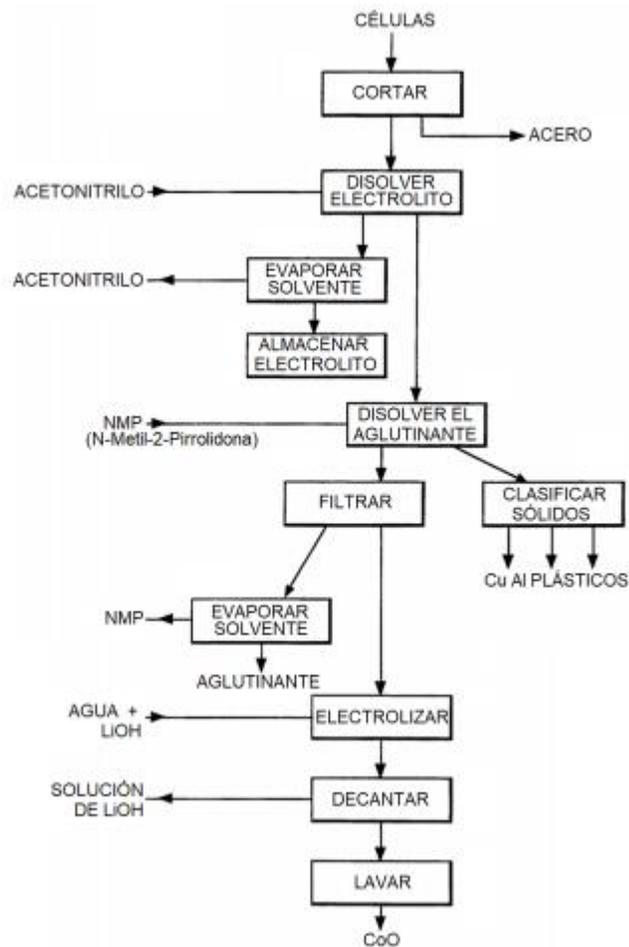
⁷² (Lain M. J., 2001)

⁷³ (Lain M. J., 2001)

partículas de carbono aumentan la conductividad electrónica durante la reacción electroquímica y cualquier litio residual se intercala al mismo tiempo. La evolución del hidrógeno es una reacción secundaria no deseada, por lo tanto, el hidróxido de litio acuoso se usa como electrolito, y el colector de corriente es grafito. Así entonces, se procesa LiCoO_2 , obtenerse CoO depositado, y LiOH en forma acuosa.

Los métodos electroquímicos, pueden recuperar y enriquecer Co y Li sin introducir nuevas impurezas y contaminación, para obtener productos de alta pureza, y es un método relativamente respetuoso con el medio ambiente, sin embargo, los métodos electroquímicos consumen mucho tiempo y energía, lo que limita su amplia aplicación en la industria⁷⁴.

Figura 8 Diagrama de flujo reciclaje de baterías AEA



Fuente: (Lain M. , 1998)

⁷⁴ (An, 2019)

3.2.2. Generación

Los datos de generación obtenidos fueron obtenidos mayormente en Latino América, es cuales se consideran una estimación debido a que no se encuentran datos oficiales de los años actuales.

Tabla 3 Tasa de generación de pilas y baterías de estados unidos, argentina y España

País	Tasa de generación g/hab.día
Estados unidos	1,42
Argentina	0.34
España	0.55

Fuente: Elaboración propia, Caracterización de la generación y evaluación de riesgos de las pilas y baterías en desuso en la Ciudad de Cochabamba

Tabla 4 estimación de generación de pilas y baterías de latino América

País	Población MM	Generación (TON/año)
México	112,33	29,169
Argentina	41,44	43,643
Chile	17,62	4280,00

Fuente: Elaboración propia, Diagnóstico Producción, Importación Y Distribución Y El Manejo De Los Residuos De Pilas, diciembre 2011.

3.3. Situación nacional

Hasta el año 2005, la cantidad de pilas y baterías desechadas de diferente tipo podía calcularse sobre un promedio anual de 2.320 toneladas importadas anualmente (INE 2005). En 2010, el proyecto SGAB – ciudades forestales implementó el Plan de Gestión Ambiental de pilas y baterías secas usadas en la ciudad de Cochabamba, el cual pronosticó el aumento de estos residuos en un 40%, en un plazo de 5 años, es decir hasta el total de 4547.2 toneladas para el 2015.

Sólo en las ciudades del eje troncal del país, como La Paz, Cochabamba y Santa Cruz de la Sierra, las empresas municipales de aseo han iniciado gestiones a través de campañas educativas y la implementación de puntos de recolección de baterías y pilas. Para tal efecto, se han instalado en puntos estratégicos como supermercados, ferias y otros centros comerciales, botellones de plástico de 20 Litros de capacidad y otro tipo de recipientes de

similares características. Y a su vez empresas privadas como fundación viva cuya logística es particular con personal mantenimiento de celular en espacios públicos.

En Bolivia, la única industria que tiene actualmente un programa de reciclaje LIBS, únicamente es de baterías de plomo es la industria BATEBOL S.A., fabricantes de baterías de Plomo. El cuidado del medio ambiente y la sociedad forman parte de uno de sus tres pilares fundamentales de responsabilidad social empresarial (RSE)⁷⁵. Es destacable el intento del uso de TIC en medios masivos para apelar a la conciencia ambiental de las personas gradualmente en cuanto a todos los residuos generados a nivel Bolivia.

3.3.1. Situación en la ciudad de La Paz

En La Paz, el proyecto de recolección pilas y baterías usadas, cuenta 85 puntos de copio en farmacias, supermercados, bancos, tiendas, clínicas y oficinas municipales. Se estima que por día se llegaron a recolectar 1,5 Ton de estos residuos (⁷⁶).

Figura 9 Bolivia, Material educativo para separación de pilas y baterías en La Paz



Fuente: (Diagnostico de la Gestion de Residuos Solidos en Bolivia)

Uno de los proyectos más notables para la disposición final de estos residuos es impulsado por “Recicla” que a través de diversas iniciativas como la actividad denominada “Juégle Limpio a tu Ciudad”, logró acopiar 14 toneladas de pilas y baterías usadas.

En la gestión 2012, en convenio con el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz se logró realizar la disposición final de todo el material acopiado, en el Relleno Sanitario de Alpacoma,

⁷⁵ <https://www.kioscoverde.bo/>

⁷⁶Gestión de Residuos Sólidos Peligrosos y Residuos Sólidos Especiales

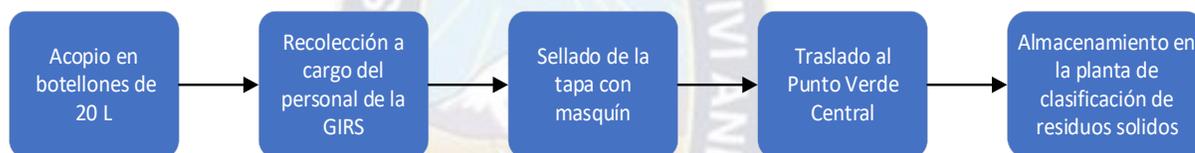
donde Soboce apoyó con la donación de 2 cámaras de hormigón, las cuales fueron construidas en base a las especificaciones técnicas del municipio (⁷⁷).

Tabla 5 Generación de pilas primarias y secundarias

Características	AÑO					
	2010	2011	SOBOCE	2012	2013	Otros envases
N° de botellones	18	32	619	53	31	17
Peso (Kg)	495	880	17022,50	1457,50		840,72
Total (Kg)	495		17902,5	1457,50		840,72

Fuente: GMLP -Siremu 2014.

Figura 10 Diagrama gestión de pilas y baterías en el Municipio de La Paz por el GMLP



Fuente: Elaboración Propia

Por el momento en Bolivia se identificaron empresas dedicadas al almacenamiento, recolección y trazabilidad de Residuos de Aparatos y Equipos Electrónicos (RAEE), como ser:

- Kiosco Verde (apoyo de Swisscontact),
- FUNDACIÓN VIVA
- RECICLA,
- FUNDARE (Santa Cruz),
- BOLREC (Santa Cruz),
- RECUMET (Cochabamba),

De acuerdo con el marco de ley N° 755 LEY DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS, estas empresas y el gobierno a su vez proveen asesoramiento técnico, respecto a cualquier situación referente a residuos, en forma de consultoría y/o talleres: asistencia en la gestión integral de residuos, Producción Más Limpia (PML), logística, educación y concientización, aprovechamiento de residuos. Antepone el principio de “reducir, reutilizar y reciclar” en los procesos productivos industriales. En ámbito del mercado que estos residuos presentan,

⁷⁷ (Proyectos RSE-recicla, s.f.)

estas entidades buscan empresas dedicadas al reciclado, estabilización, y el gestionado hasta su disposición final o más aun generar una economía circular donde según Ellen MacArthur Fundación, la Economía Circular se basa en tres principios: 1.) Eliminar residuos y contaminación desde el diseño, 2.) Mantener productos y materiales en uso el mayor tiempo posible y 3.) Regenerar sistemas naturales⁷⁸, plantea un nuevo paradigma desde el diseño y manufactura de un producto hasta la transformación de este, y amplía la cadena de valor de los materiales o productos reciclados una vez entran nuevamente al ciclo productivo.⁷⁹,

Actualmente no se realizó ningún tipo de diagnóstico en el cual se determine el dato sobre la cantidad de generación de baterías de celulares por habitante en el Municipio de La Paz. El diagnóstico es general para todo los RAEE's. En la gestión 2017 El MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA (MMAyA) realizo el diagnóstico de la Gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos en Bolivia y Análisis Estadístico de forma general.

3.4. Normativa Nacional vigente referente al tema de residuos solidos

3.4.1. Constitución política del estado plurinacional de Bolivia

Aprobada en enero de 2009, mediante la cual Bolivia se establece como un Estado Unitario Social de Derecho Plurinacional Comunitario. En la constitución se establece la distribución de competencias privativas, exclusivas, concurrentes y compartidas de cada nivel del Estado (Gobierno Central, Departamental y Municipal) (Bolivia, Estado Plurinacional, 2009). En cuanto a los residuos sólidos, la constitución establece competencias privativas y exclusivas para el Gobierno Central del Estado, que consisten en la formulación de políticas de estado y el régimen general. Así mismo, establece competencias concurrentes entre el Gobierno Central y las Entidades Territoriales Autónomas, con respecto al tratamiento de residuos sólidos industriales y peligrosos. En el caso de los Gobiernos Autónomos Municipales se define competencias exclusivas, referentes a la ejecución de los servicios de aseo urbano, manejo y tratamiento de los residuos sólidos.

3.4.2. Ley del Medio Ambiente (Ley 1333)

Promulgada el 27 de abril de 1992, con el propósito de proteger y conservar el Medio Ambiente. Esto mediante la regulación de los impactos negativos de las actividades

⁷⁸ <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/concepto>

⁷⁹ <https://www.www.swisscontact.org/> La Economía Circular, una propuesta para la reactivación económica

humanas en el medio ambiente, estableciendo medidas de mitigación y sanciones en caso de infracción. La Ley se compone de varios reglamentos, pero por la temática del presente estudio, se hace énfasis en los Reglamentos de Gestión de Residuos Sólidos y el Reglamento para Actividades con Sustancias Peligrosas (Bolivia, 1992).

3.4.2.1. Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos

Fue promulgado el 8 de diciembre de 1995, mediante Decreto Supremo N° 24176, con el propósito de establecer un régimen jurídico para la ordenación y vigilancia de la gestión de los residuos sólidos. En este instrumento regulatorio se fomenta la reducción y la reutilización de los residuos, además de su aprovechamiento a través de procesos de recuperación de los recursos contenidos en ellos. En el artículo 4, se menciona que los residuos especiales y peligrosos deben ser gestionados de forma separada de los demás residuos urbanos. Además, el manejo de los residuos peligrosos se debe realizar conforme una reglamentación específica ⁸⁰.

3.4.2.2. Reglamento para Actividades con Sustancias Peligrosas

Fue promulgado el 8 de diciembre de 1995 con el propósito de establecer su manejo, control y de esta forma reducir los riesgos asociados.

En el artículo 2, se menciona que se considera sustancias peligrosas a aquellas que tengan las características de: corrosivo, explosivo, inflamable, patogénico o bio-infeccioso, radioactivo, reactivo y tóxico. En el artículo 14, se establece que las empresas generadoras u operadoras de sustancias peligrosas deben reducir progresivamente la generación de residuos peligrosos. En el artículo 38, se hace referencia a que el Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente (ahora Ministerio de Medio Ambiente y Agua) debe ofrecer información sobre tecnologías limpias para la optimización del aprovechamiento de las sustancias peligrosas y así minimizar la generación de sus residuos.

3.4.2.3. Normas Bolivianas sobre gestión de RAEE

Considerando la importancia de una gestión eficiente y eficaz de los RAEE ha elaborado una normativa técnica específica para la gestión de este tipo de residuos, se trata de la NB 69018 y la NB 69019.

⁸⁰ (Bolivia, Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2011) (Bolivia, MMAyA, 2012).

Tabla 6 Normas Bolivianas sobre gestión de RAEE

NORMATIVA BOLIVIANA (NB)	DETALLE
NB 69018:2012 Residuos sólidos	Residuos de aparatos eléctricos y/o electrónicos - Definiciones y clasificación.
NB 69019:2012 Residuos sólidos	Residuos de aparatos eléctricos y/o electrónicos - Manejo de residuos de aparatos eléctricos y/o electrónicos.

Fuente: Elaboración propia

- En la Norma Boliviana 69018 se detallan los términos y definiciones relacionados con los RAEE, así como su clasificación. Se define como residuo de aparatos eléctricos o electrónicos a todo equipo que funciona con energía eléctrica de las siguientes características:
 - a) Electrodomésticos y electrónicos de consumo
 - b) Equipos de informática y/o telecomunicación
 - c) Equipos y Herramientas Eléctricas y/o Electrónicas hasta límite de Consumo de Potencia de 250 W (con excepción de las herramientas industriales fijas de gran envergadura)
 - d) Juguetes, equipos deportivos y tiempo libre
 - e) Instrumentos de Medición y Control
 - f) Materiales Eléctricos y Electrónicos varios (conductores, baterías, contactos, etc.)
- En la Norma Boliviana 69019 se establecen las condiciones y requisitos necesarios para el manejo de los RAEE. En esta norma se establecen las medidas que deben ser adoptadas para un manejo ambientalmente seguro de los residuos de los aparatos eléctricos y/o electrónicos - RAEE, con la finalidad de prevenir, reducir y mitigar los impactos negativos que este manejo pueda ocasionar sobre la salud y el ambiente. Así mismo se promueve el aprovechamiento mediante el reacondicionamiento o reciclado de sus componentes.

3.4.2.4. Ley de Gestión Integral de Residuos N°755

La Ley N° 755 de Gestión Integral de Residuos fue promulgada el 28 de octubre de 2015, para establecer la política general y el régimen jurídico de la Gestión Integral de Residuos en el Estado Plurinacional de Bolivia. En la ley se fomenta la reducción, el aprovechamiento y la minimización de disposición final de los residuos sólidos.

Tabla 7 Artículos de la Gestión integral de residuos sólidos Ley N° 755

ARTÍCULOS	DETALLE
Artículos 26-32	Se establecen los lineamientos para la gestión de los residuos.
Artículo 27	Indica que los residuos deben clasificarse en orgánicos, reciclables, no aprovechables, especiales y peligrosos.
Artículos 34, 35 y 37	Hace referencia a la gestión de los residuos municipales, especiales y peligrosos.
Artículo 38	Hace referencia a la responsabilidad extendida del productor. Según este régimen especial, tanto a productores como a distribuidores deben responsabilizarse por la gestión de sus productos.

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.5. Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos, D.S. 2954

El 19 de octubre del 2016 se emitió el D.S. 2954 con el cual se establece el Reglamento para la Gestión de los Residuos Sólidos en el marco de la Ley N° 755 (Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia, 2016). Este reglamento establece las normas operativas para la aplicación de la Ley N° 755. Se refiere a la gestión de los RAEE en un solo artículo que establece lo siguiente:

Tabla 8 Artículo 47 del Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos, D.S. 2954

1. ARTICULO	2. DETALLE
Artículos 47 (RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR – REP)	Se amplía el régimen de Responsabilidad Extendida del Productor – REP, a los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, que no sean generados por actividades propias y específicas del sector eléctrico en el marco de la Ley N° 1604, de 21 de diciembre de 1994 ⁸¹ .

Fuente: Elaboración propia

3.5. Convenios internacionales

3.5.1. El convenio de Basilea

El Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los residuos peligrosos y su eliminación es el tratado multilateral de medio ambiente que se ocupa más exhaustivamente de los desechos peligrosos y otros desechos. Cuenta con 170 países miembros (Partes) y su objetivo es proteger el medio ambiente y la salud humana contra los efectos nocivos derivados de la generación, el manejo, los movimientos transfronterizos y la eliminación de los desechos peligrosos y otros desechos. Bolivia es parte de los países que firmaron el convenio (PNUMA, 1989) (UNEP, 2010). El Convenio obliga a las Partes en él a asegurar que los desechos peligrosos y otros desechos se manejen y eliminen de manera ambientalmente racional. A ese fin, se espera de las Partes que minimicen las cantidades que atraviesan las fronteras, que traten y eliminen los desechos lo más cerca posible del lugar donde se generen y que impidan o minimicen la generación de desechos en origen. Se han de aplicar controles estrictos desde el momento de la generación de un desecho peligroso hasta su almacenamiento, transporte, tratamiento, reutilización, reciclado, recuperación y eliminación final.

Desechos que no estarán sujetos a lo dispuesto en el apartado del convenio

a) del párrafo 1 del Artículo 1 del Convenio de Basilea, en una cantidad tal que les confiera una de las características del anexo III.

Tabla 9 Desechos de metales y desechos que contengan metales

B1010	Desechos de metales y de aleaciones de metales en forma metálica y no dispersable
	Metales preciosos (oro, plata, el grupo del platino, pero no el mercurio)

⁸¹ Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia, 2016, pág. 12

Chatarra de hierro y acero
Chatarra de cobre
Chatarra de aluminio
Chatarra de zinc
Chatarra de estaño
Chatarra de tungsteno
Chatarra de molibdeno
Chatarra de tántalo
Chatarra de magnesio
Desechos de cobalto
Desechos de bismuto
Desechos de titanio
Desechos de zirconio
Desechos de magnesio
Desechos de germanio
Desechos de vanadio
Desechos de hafnio, indio, niobio, renio y galio
Desechos de torio
Desechos de tierras raras
Chatarra de cromo

Fuente: Anexo III - Convenio de Basilea en 2014

Tabla 10 Clasificación, composición y usos de pilas y baterías en argentina, convenio

Pila y Batería		Composición ⁽¹⁾⁽²⁾		Clasificación s/ 24.051 ⁽³⁾		Usos y Características			
Tipo	Nombre	Electrodo	Notación Compuesto	Anexo I	Anexo II				
Secundarias (Recargables)	Níquel/ Cadmio (Ni/ Cd)	Cátodo	Hidróxido de Níquel	Y26 e Y35	H6.1, H11, H12 y H8	Para equipamiento eléctrico y electrónico sencillo y de bajo consumo, teléfonos celulares, computadoras portátiles. Poseen ciclos de vida múltiples, presentando la desventaja de su relativa baja tensión. Pueden ser recargadas hasta 1000 veces y alcanzan a durar decenas de años.			
		Ánodo	Cadmio						
		Electrolito	Hidróxido de Potasio						
	Níquel/ Hidruro metálico (Ni/HM)	Cátodo	Óxido de Níquel	Y35	S/ condic. H6.1, H11 y H8		Sistema similar al Ni/Cd, donde el Cd ha sido reemplazado por una aleación metálica capaz de almacenar hidrógeno que cumple el papel de ánodo. La densidad de energía producida es el doble de la producida por Ni/Cd, a voltajes operativos similares.		
		Ánodo	Hidruro metálico						
		Electrolito	Hidróxido de Potasio						
	Ion-Litio	Cátodo	Óxidos metálicos con Litio	Y42	S/ condic. H1			Utilizada para telefonía celular, computadoras, cámaras fotográficas y de video.	
		Ánodo	Carbón de grafito						
		Electrolito	Sales de Litio y Solventes Orgánicos						
	Plomo	Cátodo	Óxido de Plomo	Y31 e Y34	H5.1, H6.1, H11, H12 y H8				Automotores(para el arranque de motores), industrial y domésticos.
		Ánodo	Plomo						
		Electrolito	Acido Sulfúrico						

Fuente: gestión de pilas y baterías eléctricas Argentina

3.5.2. El protocolo de Montreal

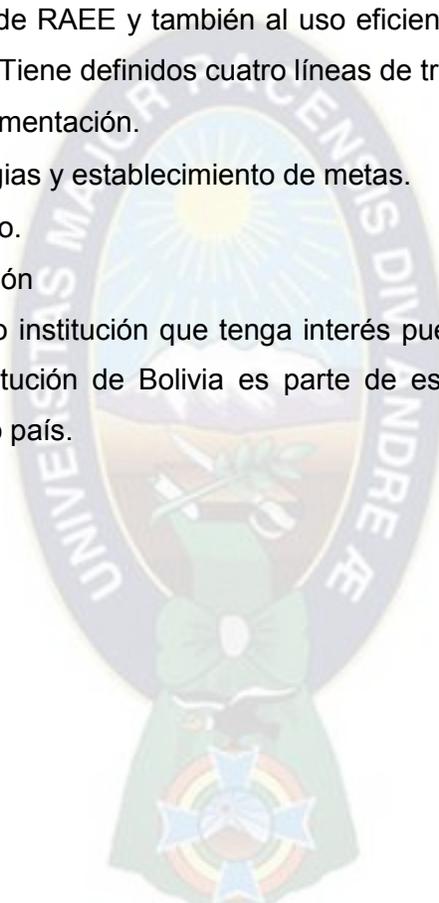
Acuerdo internacional multilateral que limita, controla y regula la producción, el consumo y el comercio de sustancias agotadoras de la capa de ozono. El acuerdo se celebró el 16 de septiembre de 1987, entró en vigor en el mes de enero de 1989. A la fecha ha sido ratificado por 196 países y se considera uno de los casos más exitosos de cooperación internacional (PNUMA, 2006). Bolivia ha suscrito y ratificado este protocolo mediante ley N° 1584 del 3 de agosto de 1994, constituyéndose a partir de ese momento en Estado Parte. Este acuerdo tiene por objeto de identificar una serie de compuestos y sustancias que dañan la capa de ozono conocidas como SAO (sustancias agotadoras de ozono), tales como clorofluorocarbonos CFC, halones o bromuro de metilo, entre otras, con la intención de controlar y restringir su utilización a nivel mundial, estableciendo plazos y metas para su eliminación. Los plazos y metas varían de una nación a otra dependiendo de su condición de país desarrollado o en desarrollo y del consumo per cápita de sus habitantes de estas sustancias.

3.5.3. Acuerdos y programas internacionales en gestión de RAEE

Además de los convenios mencionados anteriormente que establecen un marco legal para los flujos internacionales de RAEE, existen iniciativas y acuerdos internacionales que tienen el objetivo de mejorar y facilitar la gestión de RAEE asumiendo éste como un problema de características planetarias. Se tiene por ejemplo la iniciativa Step (Solving The E-Waste Problem) (Step, 2017) que reúne un grupo de 55 instituciones públicas y privadas de todo el mundo que se ha planteado el objetivo de ofrecer soluciones para la gestión adecuada de los RAEE. Pretende desarrollar y difundir sistemas de control de los riesgos que plantea la generación de RAEE y también al uso eficiente de recursos que se emplean en la fabricación de RAEE. Tiene definidos cuatro líneas de trabajo que son:

- Investigación y experimentación.
- Desarrollo de estrategias y establecimiento de metas.
- Formación y desarrollo.
- Comunicación y difusión

Cualquier organización o institución que tenga interés puede ser parte de esta iniciativa, sin embargo, ninguna institución de Bolivia es parte de esta iniciativa que podría ser de mucha utilidad para nuestro país.



CAPITULO

IV

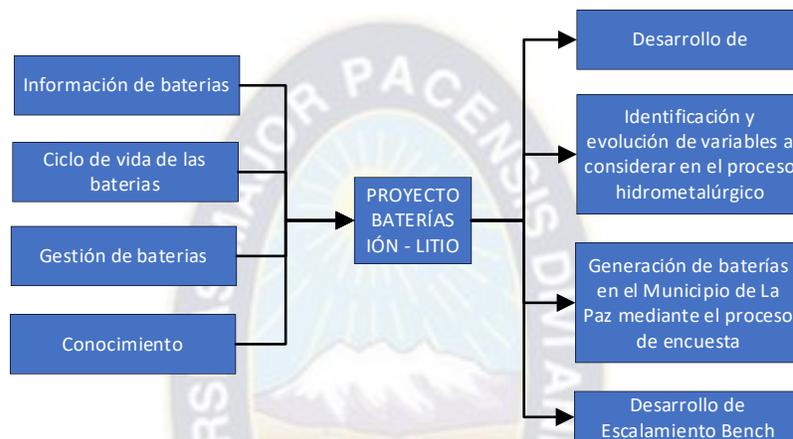


4. Marco Práctico

4.1. Metodología (enfoque sistémico)

Para el presente proyecto se empleó la metodología del enfoque sistémico, una herramienta eficaz que permitirá obtener buenos resultados y sistematizar todos los pasos predefinidos para desarrollar el proyecto, lo que se describen, por etapas, en la siguiente figura:

Figura 11 Flujoograma del enfoque sistémico de gestión ambiental aplicado al proyecto

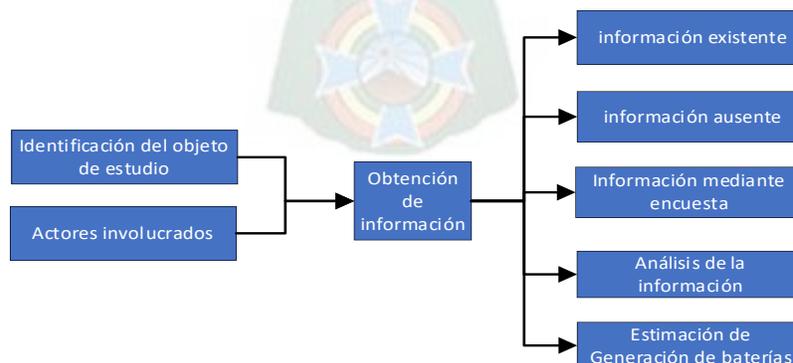


Fuente: elaboración propia.

4.2. Estimación de generación de baterías en el municipio de La Paz

Para estimar el volumen de generación en el municipio de La Paz se necesita obtener información la cual coadyuvó con el presente proyecto.

Figura 12 flujoograma de estimación de generación de baterías



Fuente: Elaboración Propia

4.2.1. Identificación del objeto de estudio

El objeto de estudio para el presente proyecto son las baterías de ion-litio de los celulares móviles. Para lo cual se llevó a cabo una caracterización manual en dos botellones, sobre un lote y/o muestra de baterías donde se consiguió recolectar 481 baterías, en la siguiente tabla se muestra algunas marcas de las baterías recolectadas:

Tabla 11 Caracterización de baterías por tipo

Tipo de batería	Batería	Cantidad (unidades de pilas)
Samsung		191
LG		16
Nokia		45
Sony		35
Sony Ericson		43
Huawei		28
Motorola		6
Alcatel		6
Otros		111

Fuente: elaboración propia.

4.2.1.1. Ciclo de vida de las baterías

El ciclo de vida es un concepto que remite a la aparición, desarrollo y finalización de la funcionalidad de un determinado elemento, en nuestro caso el ciclo de vida de las baterías de teléfonos celulares. La cual es relativamente corta y disminuye como resultado de los

rápidos cambios de las características y capacidades de los equipos, creando un flujo importante de residuos de baterías, la vida útil de una batería de ión litio es de dos a tres años⁸².

4.2.2. Importación, Ingreso y distribución

En el Municipio de La Paz, al igual que en el resto del país, la importación es realizada por empresas de importación, mayoristas o asociación de comerciantes que importan determinados tipos y marca de celulares. Algunos son desmantelados e importados por partes, por lo que siguen un proceso de montaje en talleres locales, para posteriormente ser distribuidos a minoristas que realizan sus operaciones en mercados populares.

En el caso de Bolivia, el total de las baterías que ingresa al mercado nacional es importado, ya que actualmente no hay empresas fabricantes de baterías de ion litio en Bolivia. En el municipio de La Paz, las baterías están a la venta en zonas donde el comercio está enfocado a la venta de tecnología.

4.2.3. Distribución legal e ilegal

Si bien el Municipio de La Paz cuenta con distribuidoras ubicadas en la ciudad, existen pequeños distribuidores informales que internan estos productos al país por vía del contrabando.

4.2.4. Comercialización

Los lugares de mayor comercialización son la Eloy Salmon, pero también existen pequeños distribuidores que se encargan de comercializar generalmente por la vía ilegal.

4.2.4.1. Vacíos de información identificada

En el municipio de La Paz no se tiene información concreta con respecto a la generación anual de baterías usadas por habitante.

- No existe Información formal sobre el tipo de baterías de mayor consumo en el Municipio de la paz.
- No se cuenta con información de cuál es la locación de comercialización dentro del Municipio de La Paz.
- Saber si la población tiene conciencia a la hora de comprar una batería, preferencias de consumo.

⁸² (Quintero, Che, Ching2, Auciello, & de Obaldía, 2021)

4.3. Elaboración y aplicación de encuesta en el municipio de La Paz

4.3.1. Tamaño de la muestra para realizar la Encuesta

Como evidentemente no es factible realizar la encuesta a todas las viviendas del municipio, lo que se hace es tomar una muestra aleatoria dentro del municipio y esta muestra representará a la población total a investigar. Para el presente estudio se calculará el tamaño de muestra para denotar el número de encuestas necesarias, así el presente estudio sea considerado como una investigación valida y estadísticamente correcta.

Selección de muestra

Nuestra muestra es el Municipio de La Paz (Departamento de La Paz – Provincia Murillo, sección capital), del cual se determinará el número total de viviendas a encuestar. Con el fin de conocer principalmente la generación de residuos de baterías de ion litio.

Tamaño de muestra

Para la aplicación de la encuesta se determinó el tamaño de muestra, se deben determinar las unidades familiares de la siguiente forma:

El universo corresponde al número total de viviendas del año 2012 tomando en cuenta la tasa de crecimiento hasta el 2020, dentro del Municipio de La Paz (Departamento de La Paz – Provincia Murillo, sección capital), calculando se estima 822,705 habitantes y calculando el promedio de 4 habitantes por vivienda se obtuvo un total de 205,676 unidades de familiares.

para la determinación del tamaño de muestra, recurrimos a la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Z^2 \times p \times q \times N}{(N - 1) \times e^2 + Z^2 \times p \times q} \quad (20)$$

Donde:

n =encuestas por realizar

$Z = 1,96$ Para un intervalo de confianza del 95% y 5% de error

p = probabilidad de que ocurra el evento estudiado 0,50

$q = (1-p)$ probabilidad de que no ocurra el evento estudiado 0,50

N = unidades familiares

e = Error de muestreo estimado en un 5%

Datos teóricos:

$e = 0,05 = 5\%$

$Z = 1,96$

$N = 205,676$

p = probabilidad de que ocurra el evento estudiado 0,50

$q = (1-p)$ probabilidad de que no ocurra el evento estudiado 0,50

Entonces:

$$n = \frac{(1,96)^2 \times 0,50 \times 0,50 \times 205,676}{(205,676 - 1) \times (0,05)^2 + (1,96)^2 \times 0,50 \times 0,50}$$

$$n = 383,67$$

Este resultado nos indica que se requiere encuestar a 384 personas.

4.3.2. Diseño de encuesta

Para generar la información deseada se elaboró las preguntas en función a los siguientes parámetros:

- Estimar la cantidad de las baterías que se utilizan por hogar
- Determinar el tiempo de vida útil de las baterías de celular
- Conocimiento del impacto ambiental y en la salud por desechar baterías de celular al medio ambiente.
- Comportamiento que tiene la población a la hora de desechar las baterías
- Estimar la cantidad de baterías de celular que son desechadas por los consumidores

A partir de estos parámetros se diseñó un modelo de encuestas con preguntas abiertas, y cerradas de opción múltiple.

4.3.2.1. Aplicación de la encuesta

Tabla 12 Base de datos encuestas de baterías de celular en el Municipio de La Paz

Encuesta baterías en el municipio de La Paz					
1. ¿Celulares móviles poseen en su hogar actualmente?	1 a 4	4 a 8	8 o más		
2. Si existiera una cantidad fuera de uso ¿Cuál es la razón?	Cambio de celular a uno moderno	Celular en mal estado	Hinchazón de la batería de celular (genera inestabilidad en el celular)	otra opción	

3. ¿Usted cada cuanto renueva o cambia su teléfono móvil (celular)?	cada 6 meses aproximadamente.	cada año	cada 2 años	cada 3 años	
4. ¿En el caso de cambiar de baterías de celular que hace con la en desuso?	La bota con el resto de la basura	La guarda en su hogar	La lleva algún lugar de acopio de reciclaje	Diferencia la basura para llevarla a un contenedor especial	La deja en algún servidor (técnico de celulares)
5. ¿Qué marca de teléfono móvil (celular) utiliza comúnmente? (Puede elegir uno o varias opciones).	Samsung Sony	Sony Ericsson LG	Huawei Xiaomi	Alcatel Nokia	Apple Motorola
6. ¿Dónde compra comúnmente sus celulares?	Comercio formal (importadoras autorizadas, con facturación)	Importación directa (compra online)	Comercio informal (sin facturación)	Segunda mano (conocidos, amigos, otros)	
7. ¿Usted sabía que es posible dar un tratamiento u disposición final a las baterías de telefonía móvil (celulares), debido a que llegaría afectar la salud o el medio ambiente, porque son consideradas peligrosas?	Si	No			
8. ¿Usted estaría de acuerdo en entregar sus baterías de telefonía móvil (celular) en desuso para el reciclado de las mismas?	Si	No			
9. Si en caso de que una empresa recicladora de baterías de celular decida comprar sus baterías en desuso, preferiría que le paguen por unidad o kilo:	Unidad	Kilo			
10. Cuanto estaría dispuesto a pagar por el reciclado de las baterías de celular	Menos de 1 boliviano por batería	1 boliviano por batería	5 bolivianos por kilo	10 bolivianos por kilo	No estoy dispuest@ a pagar
11. ¿Conoce alguna institución y/o empresa que recicle baterías de celular?	Si	No			

<p>12. ¿En caso de que una empresa de reciclaje requiera que Ud. pague por reciclar sus baterías usadas de celular, con cual idea se siente más identificado sobre la forma de pago?</p>	<p>No tengo por qué pagar, es deber de la empresa reciclar los residuos que genero</p>	<p>Estoy dispuesto a apagar porque alguien recoja mis residuos, pero lo mínimo posible</p>	<p>Estoy dispuesto a apagar porque alguien recoja mis residuos, pero no estoy seguro de cuanto</p>	<p>Usualmente pago por los servicios de reciclaje de mis residuos, mientras sea una tasa justa</p>	<p>Usualmente pago por los servicios de reciclaje de mis residuos, y si puedo dono residuos</p>
---	--	--	--	--	---

Las encuestas se aplicaron a personas mayores de edad, sin incluir el registro de datos personales, excepto sexo y edad.

Fuente: Elaboración Propia

4.3.3. Generación de baterías de ion litio

La herramienta para el cálculo de generación, es el método de estimación por penetración de materiales.

Método uso consumo, donde se toma en cuenta los resultados de la encuesta para estimar la generación de baterías usadas en unidades familiares del municipio de la Paz, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Generación = \frac{h_t \times p_t \times a_t}{V_u} \quad (21)$$

Donde:

$Generación$ = Generación

h_t = número de hogares en el municipio de La Paz el año 2012

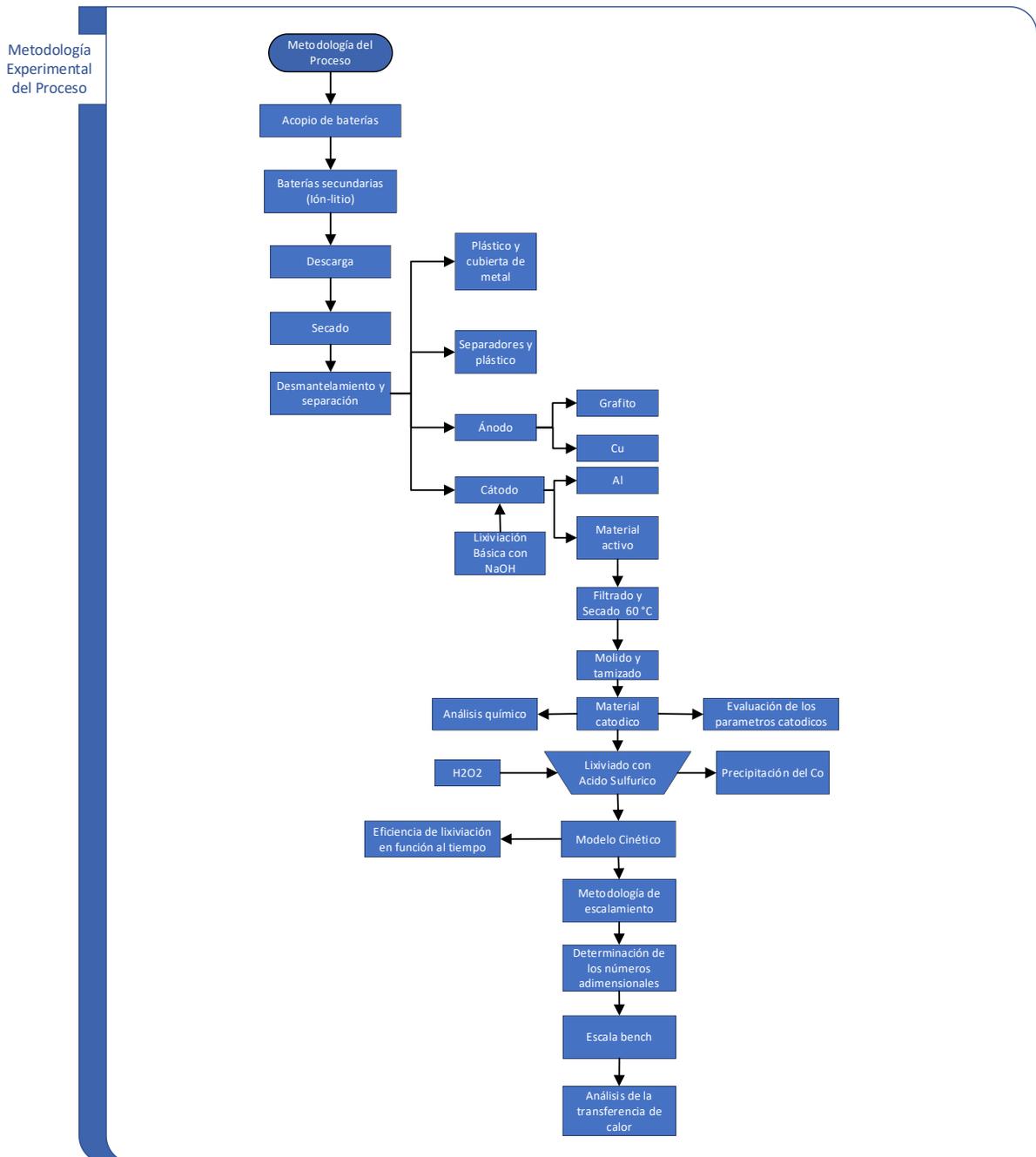
p_t = penetración de baterías usadas

a_t = Número de baterías en el hogar

V_u = tiempo de vida útil de las baterías usadas

4.4. Metodología (enfoque experimental)

Figura 13 Metodología experimental del proceso



Fuente: Elaboración Propia

4.4.1. Acopio de las baterías

Las baterías de celulares fueron recolectadas de diferentes puntos de servicios técnicos de la ciudad de La Paz, donde algunos guardan las baterías que ya no sirven en recipientes,

mientras que otros optan por desechar junto con la basura común. Algunos servicios técnicos trabajan con empresas como es el caso de FUNDACIÓN VIVA, a quienes son entregados las baterías. Estas baterías fueron llevadas a tratamiento como es mencionado a continuación para obtener el material catódico libre del resto del material que no es de interés para el presente trabajo.

4.4.2. Descarga de las baterías

Para la descarga de las baterías se realizó mediante inmersión de las mismas en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 5% p/v a temperatura ambiente. Así evitar el riesgo de explosión por cortocircuitos y auto incendios, principalmente cuando los ánodos y cátodos se ponen en contacto durante el desmontaje⁸³. Inicialmente a cada una de las baterías se les realizó una pequeña perforación para permitir el ingreso de la solución a su interior, las baterías fueron puestas dentro de un balde con 20 L de solución salina utilizando 1kg de cloruro de sodio (sal común) hasta que estas quedaran totalmente sumergidas.

4.4.3. Secado de las baterías

Para el secado de las baterías, una vez habiendo terminado la descarga, se dejó a temperatura ambiente (de la ciudad de La Paz, 15 °C aproximadamente) sin exposición al sol.

4.4.4. Caracterización y Clasificación de las baterías

Una vez las baterías descargadas y secas, fueron clasificadas de acuerdo a la marca y tipo de batería; ion litio o polímero, con el fin de conocer que baterías hay en mayor cantidad.

4.4.5. Desmantelamiento de las baterías

El desmantelamiento se realizó manualmente con el fin de realizar una caracterización cualitativa y cuantitativa de las baterías, así conocer su composición y sus características internas. Se utilizó tijeras y alicates para remover la cobertura de la batería teniendo cuidado de retirar el cátodo intacto, dado que el material catódico se encuentra localizado en el cátodo de la batería, ya que el análisis subsiguiente se centró en esta porción de la batería. Cada componente de la batería fue pesada de manera total y por unidad, para conocer la composición de una batería mediante una caracterización cuantitativa.

4.4.6. Separación del material catódico

Los cátodos fueron lixiviados en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 5 % (p/v) (1,3 M). La reacción que se lleva a cabo es exotérmica y violenta, por lo que los cátodos se añadieron poco a poco, evitando tener problemas de seguridad y pérdidas del material catódico por rebalse.

⁸³ (Guevara Coronado, Andrés Mauricio; Vargas Pérez, Stefanny;, 2019)

Se logró disolver casi por completo el colector de corriente de aluminio, al que el material catódico está adherido. Por motivos de seguridad la lixiviación básica fue realizada en la cámara extractora de gases del laboratorio de análisis para determinación de demanda bioquímica de oxígeno del IIDEPROQ, ya que se desprende H_2 un gas muy inflamable.

4.4.7. Filtración

Después de la lixiviación básica, el material catódico obtenido fue lavado con abundante agua destilada a temperatura ambiente en dos etapas, y filtrada al vacío para separarlo del líquido residual. La pérdida de cobalto en el líquido filtrado contiene 1,34 mg Co/L siendo una pérdida de cobalto insignificante. El material catódico recolectado era de diferente tamaño, desde un polvo fino hasta hojuelas de 5 mm de diámetro aproximadamente⁸⁴.

4.4.8. secado

El secado del material catódico húmedo obtenido se realizó en un secador de bandejas con entrada de aire caliente a 60 °C para evaporar el líquido residual de la etapa anterior, durante el secado a esta temperatura no se produjo ningún tipo de reacción⁸⁵. El secado se realizó a la presión atmosférica de La Paz (495 mmHg).

Figura 14 Secado del material catódico



Fuente: elaboración propia

4.4.9. Molido y tamizado

Todo el material catódico fue molido y tamizado a un tamaño de partícula de 106 μm con una malla o tamiz N° 140 para homogeneizar todo el material catódico a ese tamaño. El molido fue manual, en un mortero de acero de 1 kg de capacidad. Ambos procedimientos se realizaron en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales (IIMETMAT).

4.4.10. Análisis químico del material catódico

El material catódico fue analizado mediante la técnica de espectroscopia de absorción atómica EAA (Hitachi modelo 180 30), para determinar el contenido de cobalto. También fue llevado a análisis cualitativo por difracción de rayos X (DRX), equipo Pan Analytical Expert

⁸⁴ (Nayl, Elkhashab, Badawy, & El-Khateeb, 2017)

⁸⁵ (Nayl, Elkhashab, Badawy, & El-Khateeb, 2017)

Plus con tubo generador de Rayos X de Cobre, ángulo 2θ de 3° a 60° y temperatura 25°C con el fin de conocer los compuestos presentes en la muestra del material catódico.

Las muestras para análisis eran polvo fino homogéneo con un peso aproximado de 10 gramos. Ambos análisis fueron realizados por el Instituto de Investigaciones Geológicas y del Medio Ambiente (IGEMA).

¡A partir del difractograma obtenido del análisis DRX, con la base de datos del programa Match! versión 2 los patrones experimentales de difracción fueron cotejados. El programa generó una lista de compuestos que se ajustan al patrón experimental, del cual por bibliografía⁸⁶ e inspección visual se seleccionaron los compuestos más comunes en el material catódico de las baterías de ion litio.

4.5. Evaluación de los parámetros termodinámicos

Se realizó la evaluación de los parámetros termodinámicos para la identificación de condiciones favorables para la lixiviación del cobalto. El uso de los principios termodinámicos nos permite anticipar los productos finales. Las reacciones son posibles solo si todos los valores de variación de energía libre de Gibbs (ΔG) y entalpía (ΔH) son negativos⁸⁷, así mismo se estudiará el diagrama potencial-PH, conocido como diagrama de pourbaix, ya que permiten establecer las zonas y las condiciones en que es posible lixiviar.

El análisis termodinámico fue realizado para el óxido de litio cobalto con el software HSC Chemistry 6.0, el cual tiene una amplia base de datos termodinámicos (entalpía, entropía, calores específicos, etc.), que nos permitirá calcular la entalpía de reacción y energía libre de Gibbs de las posibles reacciones durante la lixiviación a (60 , 70 y 80°C) y el estudio de diagramas E-pH con el fin de conocer las áreas de estabilidad del cobalto.

El programa no cuenta con los datos termodinámicos del óxido de litio cobalto LiCoO_2 , por lo que se tomaron estos datos de la investigación de (Chang, y otros, 2013).

Tabla 13 Datos termodinámicos del óxido de litio cobalto LiCoO_2

Elemento	Estado	T K	ΔH_f kJ/mol	ΔS_f J/mol K
LiCoO₂	sólido	298,15	-679,4	-211,75
	Cp J/mol K			
	A	B*10⁻³ T	C*10⁵ T⁻²	D*10⁻⁶ T²
	87,71	21,4	19,92	0

⁸⁶ (Warner, 2019)

⁸⁷ (Restrepo Baena)

Fuente: (Chang, y otros, 2013)

Los datos termodinámicos del LiCoO_2 se añadieron a la base de datos del programa HSC Chemistry 6.0, lo que permitió realizar los cálculos termodinámicos necesarios y la construcción del diagrama Eh-pH para su análisis.

En la opción Reaction Equation del programa se escribió la ecuación de la reacción química a analizar, los compuestos se introducen desde la base de datos del programa especificando el estado de cada compuesto (sólido, líquido, gas o acuoso). Al presionar el botón Balance Equation el programa calcula la estequiometría de la reacción. Luego, se seleccionó los límites de temperatura (0–100 °C), el paso de temperatura (10 °C) y las unidades de temperatura (Celsius) y energía (Joule). Finalmente, al presionar el botón Calculate se desplazó una ventana con los valores de ΔH , ΔS , ΔG y K (constante de equilibrio) de la reacción analizada en el rango de temperatura seleccionado. Solo se consideraron las reacciones con valores de ΔG negativos.

Para la construcción del diagrama Eh-pH del sistema electroquímico cobalto-agua se ingresa a la opción Eh-pH–Diagrams; en la ventana principal se seleccionó el elemento principal (cobalto), otros elementos (litio, el programa selecciona automáticamente al hidrógeno y oxígeno), el tipo de especies (iones acuosos), temperatura (25, 60, 70 y 80 °C) y las especies de cobalto que pueden existir en presencia de agua y/o soluciones acuosas. Luego, se presiona el botón EpH para ver el formulario de especificación del diagrama, donde se ingresó las concentraciones de los elementos seleccionados 0,05862 mol Co/kg de H_2O y 0,06223 mol Li/kg de H_2O ; y la presión atmosférica de La Paz 495 mmHg (0,66 bar). Finalmente, para generar el diagrama Eh-pH se presionó el botón Diagram.

4.6. Valores óptimos para la lixiviación del cobalto del material catódico

Los valores óptimos para el proceso de lixiviación se determinaron experimentalmente a escala laboratorio por Ángela Peñaloza Pimentel, estudiante de pregrado de la carrera Ingeniería Química de la Universidad Mayor de San Andrés, en su proyecto de grado “Recuperación de cobalto a partir de baterías de ion litio recicladas provenientes de teléfonos móviles de la ciudad de La Paz” de 2022.

4.7. Cinética de lixiviación

Para determinar la cinética de lixiviación del cobalto se estableció la ecuación cinética que describe mejor el fenómeno de recuperación de cobalto por lixiviación, como también la constante de velocidad cinética y la energía de activación requerida en el proceso de lixiviación. Durante la lixiviación del cobalto las reacciones que tienen lugar son

heterogéneas (más de una fase), es decir, entre el material catódico (sólido) y el agente lixivante (líquido), reacciones de disolución y no catalíticas.

Los modelos cinéticos del núcleo que se encoge sin reaccionar, Crank-Ginstling y Brounshtein y el de conversión progresiva para partículas esféricas de tamaño decreciente describen las reacciones heterogéneas y fueron analizados para establecer la ecuación cinética de lixiviación del cobalto⁸⁸, entonces tenemos:

Tabla 14 Ecuaciones cinéticas consideradas para la lixiviación de cobalto

Modelo cinético	Etaa controlante	Ecuación cinética
Núcleo que se encoge sin reaccionar	Difusión a través de la capa gaseosa o líquida	$X = kt$
	Difusión a través de la capa ceniza	$1 - 3(1 - X_B)^{2/3} + 2(1 - X_B) = kt$
	Reacción química	$1 - (1 - X_B)^{1/3} = kt$
Crank-Ginstling y Brounshtein	Difusión a través de la capa de producto formado	$1 - \frac{2}{3} X_B - (1 - X_B)^{2/3} = kt$
Conversión progresiva para partículas esféricas de tamaño decreciente	Difusión a través de la capa gaseosa o líquida	$1 - (1 - X_B)^{2/3} = kt$

Donde, X_B es la eficiencia de lixiviación, k es la constante de velocidad cinética y t el tiempo

Fuente: (Peñaloza Pimentel, 2022)

Donde " $k = \text{min}^{-1}$ " es la constante de velocidad cinética de primer orden para reacciones heterogéneas, es decir que para una reacción de primer orden es simplemente: $(\text{tiempo})^{-1}$ (⁸⁹).

4.7.1. Modelo cinético de la lixiviación del cobalto

El modelo cinético de la lixiviación de cobalto del material catódico de las baterías de ion litio recicladas fue determinado a partir de una lixiviación con los valores óptimos de los parámetros que se encuentran en la tabla 34, se tomaron muestras del lixiviado (20 mL) a los 10, 20, 30, 60, 90, 120 y 180 min para conocer el contenido de cobalto y el progreso de la lixiviación. El método de análisis fue por espectroscopia de absorción atómica EAA (Hitachi

⁸⁸ (Radifan Fajaryanto & Nurqomariah, 2018)

⁸⁹ (Levenspiel, 2004)

modelo 180 30), realizado por el Instituto de Investigaciones Geológicas y del Medio Ambiente (IGEMA).

La eficiencia de lixiviación de cobalto que ha reaccionado, está representada por:

$$X_{Co} = \frac{\text{cantidad de reactivo que reacciona}}{\text{cantidad inicial del reactivo}} \quad (22)$$

Donde la eficiencia de lixiviación y tiempo de lixiviación se usará para determinar la cinética de lixiviación. Los valores de la eficiencia de lixiviación y tiempo de lixiviación fueron reemplazados en las ecuaciones cinéticas los modelos cinéticos teóricos mostrados en la Tabla 14. El coeficiente de correlación R es el parámetro usado para determinar la relación lineal entre (X_{Co}, t) , entre más cercano es el valor de R a uno la gráfica de estas variables se aproxima a una línea recta. La pendiente de la ecuación lineal ajustada ($y = a + bx$) de la ecuación cinética es la constante de velocidad cinética ($k = b$), y a representa la intersección con el eje.

4.7.2. Energía de activación

La energía de activación permite evaluar el control cinético, si la reacción global del proceso está controlada por la etapa de difusión o por la de reacción química. A partir de los datos obtenidos de la lixiviación a dos diferentes temperaturas, se determinó la energía de activación por la ecuación de Arrhenius, asumiendo que la energía de activación permanece constante en ese rango de temperaturas.

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (23)$$

Donde:

k_1, k_2 = constante de velocidad cinética s^{-1}

R = constante gaseosa [$cal/mol * K$]

T_1, T_2 = temperatura [$^{\circ}C$]

E_a = energía de activación [$kcal/mol$]

Para valores de $E_a \leq 5 kcal/mol$ la reacción química es rápida, por lo que el proceso es controlado por la etapa de difusión. Para valores de $E_a \geq 10 kcal/mol$ la reacción química será más lenta, el proceso es controlado por la reacción química⁹⁰. Con el fin de comprobar si la ecuación cinética con mayor coeficiente de regresión lineal (R) es la etapa controlante se determinó y analizó el valor de la energía de activación.

⁹⁰ (Uceda Herrera, 2016)

4.7.3. Eficiencia de lixiviación en función del tiempo

Teniendo la ecuación cinética referida a la relación entre el tiempo de reacción con la eficiencia de lixiviación alcanzada, y un valor de $0,0022 \text{ min}^{-1}$ de la constante de la velocidad cinética, tenemos la ecuación cinética:

$$1 - (1 - X_{Co})^{1/3} = 0,0022 * t \quad (24)$$

Con la constante de velocidad cinética, se grafica el desarrollo de la ecuación cinética en función de la eficiencia de la lixiviación y el tiempo.

Despejando la eficiencia de lixiviación:

$$\begin{aligned} (1 - 0,0022 * t)^3 &= 1 - X_{Co} \\ X_{Co} &= 1 - (1 - 0,0022 * t)^3 \end{aligned} \quad (25)$$

4.8. Metodología para el cambio de escala

La metodología utilizada para llevar a cabo el cambio de escala fue a partir del sistema de agitación. Por lo que, primeramente, se calculará las dimensiones del reactor a nivel laboratorio en función al volumen de la solución que se tiene para posteriormente realizar el diseño del agitador, y en función a este último llevar a cabo el cambio de escala a escala bench.

4.8.1. volumen del reactor a escala laboratorio

Para el presente estudio el reactor tendrá la forma de un cilindro, por lo cual se realiza el cálculo de sus dimensiones.

Se determina el diámetro del reactor en base al volumen de la solución y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$D_{RL} = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} V_{\text{solución}L}} \quad (26)$$

Donde:

D_{RL} =diámetro del reactor a escala laboratorio[cm]

$V_{\text{solución}L}$ =volumen de la solución a escala laboratorio[cm³]

Al volumen de la solución se le debe incrementar un volumen extra de seguridad, el cual es un factor de seguridad por nivel de llenado. Este factor de seguridad significa que el reactor debe trabajar a un volumen menor al volumen máximo del reactor. Para el presente estudio se utilizó un factor de seguridad de 25%⁹¹ para mayor seguridad, es decir trabajara al 75% de su capacidad máxima.

$$V_{SL} = \% \text{factor de seguridad} * V_{\text{solución}L} \quad (27)$$

⁹¹ (Mott, 2006)

Donde:

V_{SL} = volumen de seguridad a escala laboratorio[cm^3]

%factor de seguridad =Factor de seguridad a escala laboratorio

Por lo cual el volumen del reactor tomando en cuenta este factor de seguridad será:

$$V_{RL} = V_{soluciónL} + V_{SL} \quad (28)$$

Donde:

V_{RL} = volumen del reactor a escala laboratorio[cm^3]

por lo cual la altura del reactor tomando en cuenta la altura de seguridad se determina mediante la siguiente ecuación:

$$L_{RL} = \frac{4 * V_{RL}}{\pi * D_{RL}^2} \quad (29)$$

Donde:

L_{RL} = altura del reactor a escala laboratorio[cm]

4.8.2. Diseño del agitador

En el presente estudio se utilizará una turbina con seis aspas conocida como turbina Rushton con el fin de mejorar el proceso de lixiviación, al incrementar el contacto entre el material catódico y la solución lixivante. Además de ser eficaces para un amplio intervalo de viscosidades, considerando velocidades medias de 100 a 300 rpm y elevadas de 300 a 1000 rpm⁹². Siendo la velocidad de agitación a escala bench de 173 rpm, y escala laboratorio de 360rpm, por lo que se encuentran dentro de los rangos respectivamente.

. Para el cálculo de las dimensiones del agitador tipo Rushton se utilizaron las siguientes relaciones:

Tabla 15 Proporciones geométricas para un sistema de agitación

"normal"		
$\frac{D_a}{D_R} = 0,3 \text{ a } 0,5$	$\frac{H}{D_R} = 1$	$\frac{J}{D_R} = \frac{1}{12}$
$\frac{E}{D_R} = \frac{1}{3}$	$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$

Fuente: ((Geankoplis, 1998))⁹³

⁹² (Juárez Mata)

⁹³ Operaciones unitarias en ingeniería química, McCabe, Smith, Harriott, cuarta edición, página 251

En donde:

D_a = Diámetro del agitador [cm]

D_R = Diámetro del reactor [cm]

H = Altura óptima del líquido [cm]

J = Ancho de los deflectores [cm]

W = Ancho de las paletas [cm]

L = Longitud de las paletas [cm]

E = distancia entre la parte inferior del tanque al centro de la turbina [cm]

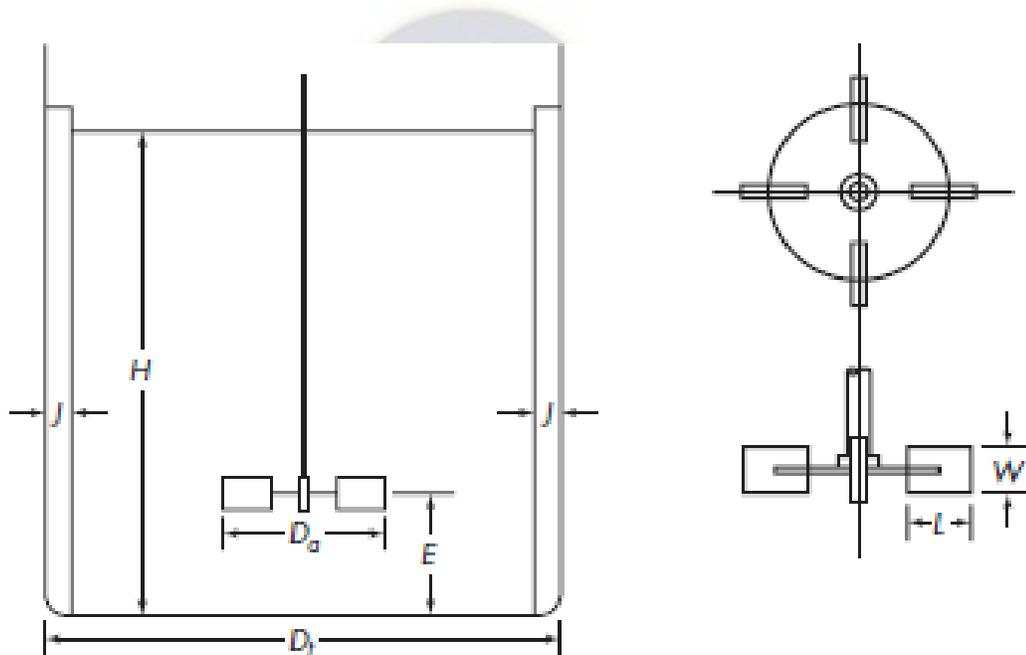


Figura 15 Dimensiones para la turbina

Fuente: (McCabe, Smith, & Harriott, 2007)

Como punto de partida en el diseño de un agitador se pueden utilizar las semejanzas geométricas estandarizadas que relacionan las medidas generales del reactor con el tipo de agitador, para lo cual se utilizó las ecuaciones de la tabla 15.

- **Potencia requerida de motor**

Un parámetro importante en el diseño de un reactor de agitación es la potencia necesaria para el mecanismo de agitación⁹⁴. Se puede conocer la potencia consumida por el agitador a través de números adimensionales, relacionando por medio de gráficos el número de Reynolds y el número de potencia. Estos gráficos van a depender de las características geométricas del agitador y de la presencia o no de placas deflectoras.

⁹⁴ (Geankoplis, 1998)

- **Número de Reynolds:** Es un parámetro adimensional, la presencia o ausencia de turbulencia puede correlacionarse con el número de Reynolds del agitador, que se define como:

$$N_{Re} = \frac{Da^2 * N * \rho}{\mu} \quad (30)$$

En donde:

D_a = Diámetro del agitador [cm]

N = Velocidad del agitador [rev/min] o [rpm]

ρ = Densidad del fluido [Kg/m³]

μ = Viscosidad dinámica del fluido [Kg/m * s]

De acuerdo con los valores calculados del Re se puede determinar si un flujo es laminar o turbulento. El flujo es laminar en el tanque cuando ($Re \leq 2000$), turbulento ($Re \geq 4000$) y para un intervalo de (Re de 2000 a 4000), el flujo es de transición⁹⁵.

- **Número de Potencia:** El consumo de potencia se relaciona con la densidad del fluido " ρ ", su viscosidad " μ ", la velocidad de rotación " N " y el diámetro del impulsor " D_a ", por medio de graficas de número de potencia " N_p " en función de " N_{Re} ". El número de potencia es:

$$N_p = \frac{p}{\rho * N^3 * Da^5} \quad (31)$$

En donde:

D_a = Diámetro del agitador [cm]

N = Velocidad de rotación [rev/min] o [rpm]

ρ = Densidad del fluido [Kg/m * s]

P = Potencia del agitador [J/s] o [W]

Con estos datos obtenemos la potencia requerida, despejando P de la fórmula de número de potencia:

$$P = N_p * \rho * N^3 * Da^5 \quad (32)$$

4.9. Determinación de los números adimensionales utilizando el análisis dimensional

El escalamiento se realizó mediante el análisis dimensional, tomando como base el principio de similaridad, donde se ha tenido en cuenta cada una de las variables que influyen significativamente en el sistema que se está analizando. Para obtener los criterios de semejanza a partir del análisis dimensional se utiliza el método de Buckingham, por lo que se

⁹⁵ (Geankoplis, 1998)

determinó los números adimensionales formados con las variables significativas involucradas.

4.10. Alcance del régimen estacionario

La mayoría de los reactores químicos se diseñan para operar en estado estacionario; sin embargo, incluso estos deben temporalmente arrancarse y parar, y por otra parte la comprensión de la dinámica del proceso es necesaria para el diseño de los sistemas de control en presencia de perturbaciones e inestabilidades, manteniendo el estado estacionario.

Las expresiones de diseño para reactores no estacionarios se basan en los balances de masa y energía, que incluyen en este caso los correspondientes términos de acumulación; se requieren asimismo las condiciones iniciales y las relaciones termodinámicas para las propiedades dependientes, como la densidad y entalpía, en su caso. La solución requiere métodos numéricos por ecuaciones diferenciales ordinarias (ODE) análogos a los empleados para reactores de flujo de pistón, aunque la solución analítica es usual para cinéticas de primer orden.

Pueden plantearse en general un máximo de N+2 ecuaciones (componentes más balances globales); para reactores tipo tanque continuos:

$$\delta(V_r * \rho) / \delta t = V_0 * \rho_0 - V * \rho \quad \delta V_r / \delta t = V_0 - V \quad (33)$$

$$\delta(V_r * C_i) / \delta t = V_0 * C_{0i} - V * C_i + V_r * r \quad \tau * \delta C_i / \delta t = C_{0i} - C_i + \tau * r_i \quad (34)$$

$$\delta(V_r * \rho * H) / \delta t = V_0 * \rho_0 * H_0 - V * \rho * H - V_r * \Delta H_r * v + U * A * (T_j - T) \\ \tau * \delta T / \delta t = T_0 - T - \tau * \Delta H_r * v / \rho C_p + UA / V_r \rho C_p * (T_j - T) \quad (35)$$

En las ecuaciones simplificadas (33, 34 y 35) se ha supuesto densidad constante para la 1ª, además de los flujos, volúmenes y C_p en las siguientes; la ecuación (34) se ha generalizado para varios componentes (i) o reacciones. Las expresiones pueden transformarse (mrl): $\delta x / \delta t = V_A / C_0 - x / \tau$; $\delta T / \delta t = (T_0 - T - \Delta H_r * x / C_p)$, $UA = 0$.

Vamos a estudiar en primer lugar el estado transitorio donde la concentración cambiara con el tiempo, hasta que la concentración se mantenga constante y es donde se alcanzara el estado estacionario, en un reactor isotérmico batch, es decir que el reactor se calentara hasta una temperatura de 70 °C y una vez alcanzada esta temperatura se mantendrá constante, siendo este el valor más adecuado para la lixiviación del cobalto, el cual fue determinado mediante pruebas de laboratorio realizada en el proyecto de grado "Recuperación de cobalto a partir de baterías de ion litio recicladas provenientes de teléfonos móviles de la ciudad de La Paz" de 2022. Por lo que el calor entregado al reactor tendrá un

valor de 114602 W y al ser una reacción exotérmica, el calor que tendrá que retirarse del sistema tendrá un valor de 980W.

La ecuación (35) no es necesaria, $T = T_0$, para una reacción de primer orden, volúmenes y densidades constantes (solo es necesario la ecuación (34)), y una perturbación $C_0 = C_0'$ ($t > 0$).

$$\tau * \frac{\delta C}{\delta t} = C_0' - C + \tau * kC \quad \int_C^{C'} \frac{\delta C}{[C - C_0'/(1 + k\tau)]} = \int_0^t (1 + k\tau)/\tau * \delta t$$

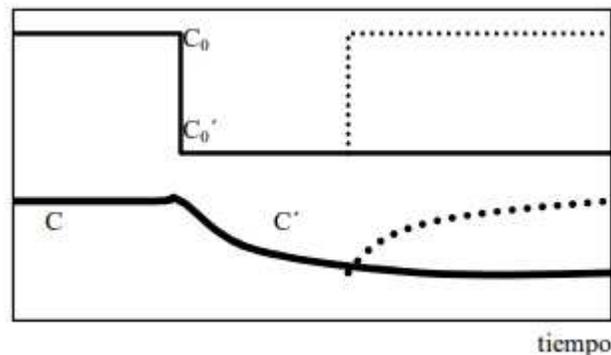
$$\ln[(C' - C_0'/(1 + k\tau))/(C - C_0'/(1 + k\tau))] = -(1 + k\tau)/\tau * t$$

Donde C es la concentración de salida para $C_0(t = 0)$:

$$0 = C_0 - C - \tau * kC \quad (C = C_0/(1 + k\tau))$$

$$C' = [C_0' + (C_0 - C_0') * e^{(1+k\tau)/\tau * t}]/(1 + k\tau)$$

Figura 16 Concentración vs tiempo



La concentración C' de salida se desplaza desde el estado estacionario C inicial a otro final de forma gradual; si la concentración inicial vuelve al valor original, lo hace también la concentración de salida; si el periodo de perturbación es pequeño, también lo es la respuesta, cuya magnitud nunca será mayor que la de la perturbación de entrada (el sistema es estable, y este lazo abierto permite alcanzar la operación estacionaria sin control de retroalimentación). Consideremos ahora el reactor inicialmente vacío, que se llena con un flujo V_0 y entonces comienza la salida con un flujo similar ($V = V_0$). Durante el periodo de carga ($0 < t < \tau = V_r/V_0$), aplicando las ecuaciones (33) y (34):

$$\delta V_r/\delta t = V_0 \quad V_r = V_0 * t$$

$$\delta(V_r * C)/\delta t = V_r * \delta C/\delta t + C * \delta V_r/\delta t = V_0 * C_0 - V_r * kC \quad \delta C/\delta t + C * (k + 1/t) = C_0/t$$

Esta es una ODE de primer orden cuya solución es:

$$C * e^{\int (k+1/t)\delta t} = \int C_0/t * e^{\int (k+1/t)\delta t} * \delta t + c; C/C_0 = (e^{kt} - 1)/(kt * e^{kt})$$

Estas ecuaciones describen el estado transitorio $C(t)$, durante este periodo de puesta en marcha; la condición inicial es $C = C_0$ ($t = 0$), y el estado estacionario $C = C_0(1 + k\tau)$ se alcanza para $t \gg \tau$. Esta es una de las formas posibles de iniciar un reactor continuo agitado, aunque suele ser conveniente comenzar la operación continua cuando el reactor está lleno y la concentración ha alcanzado el régimen estacionario; ello puede lograrse durante el periodo semicontinuo de alimentación: si V_0 en este periodo es pequeño, el reactor se llena despacio y la concentración de reactivo será baja ($C \ll C_0$), mientras que si V_0 es grande, lo hace de prisa y $C = C_0$ cuando el reactor se llena (por ello, existira una velocidad de carga a la cual se alcance simultáneamente el llenado del tanque y la concentración estacionaria. No obstante, la forma más común de iniciación es mediante un primer periodo de flujo rápido semicontinuo para llenar el reactor, seguido de otro discontinuo hasta alcanzar el estado estacionario, y finalmente la operación continua con flujos iguales de alimentación y descarga (V)⁹⁶.

4.11. Cambio de escala

El proceso de escalamiento se da desde las condiciones iniciales, donde los tamaños geométricos dados en la tabla 15 serán llevados a una escala bench con el cálculo de la relación de aumento de escala " R "⁹⁷.

El procedimiento para el cambio de una escala laboratorio a una bench, se muestra a continuación:

1. Calcularemos la relación de aumento de escala R . Suponiendo que el recipiente es un cilindro estándar con $D_{RL} = H_L$, el volumen V_L es:

$$V_{RL} = \left(\frac{\pi D_{RL}^2}{4}\right)(H_L) = \left(\frac{\pi D_{RL}^3}{4}\right) \quad (36)$$

Por tanto, la relación entre los volúmenes es:

$$\frac{V_{RB}}{V_{RL}} = \frac{\pi D_{RB}^3/4}{\pi D_{RL}^3/4} = \frac{D_{RB}^3}{D_{RL}^3} \quad (37)$$

Así, la relación de aumento de escala es:

⁹⁶ Los contenidos de este apartado del cap. se han basado en: Nauman, EB; "Chemical Reactor Design" (Caps. 4 y 8), Wiley (1987); Levenspiel, O; "Ingeniería de las reacciones químicas" (pag.252), Reverté (1986); y el análisis sobre reactor fluidizado del artículo: Elshishini SS, Elnashaie SS & El-Rifaie MA; "Multiplicity of the steady state in fluidized bed reactors- VIII. Partial oxidation of oxylene"; Comput. chem. Engng, 11(2), 95-100 (1987).

⁹⁷ (Geankoplis, 1998)

$$R = \left(\frac{V_{RB}}{V_{RL}} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{D_{RB}}{D_{RL}} \quad (38)$$

2. Al usar este valor de R , se aplica a todas las dimensiones de la tabla 15. Para calcular las nuevas dimensiones. Por ejemplo:

$$D_{aB} = R * D_{aL}, E_B = R * E_L \dots \quad (39)$$

3. Hallamos la velocidad del agitador a escala bench:

$$\frac{N_B}{N_L} = \left(\frac{D_{aL}}{D_{aB}} \right)^n \quad (40)$$

$$N_B = N_L * \left(\frac{D_{aL}}{D_{aB}} \right)^n \quad (41)$$

Tabla 16 valores de "n"

"n"	
1	Igual movimiento de líquidos
3/4	Igual suspensión de sólidos
2/3	Iguales tasas de transferencia de masa

Fuente: elaboración propia

Este valor de "n" se basa en consideraciones empíricas y teóricas⁹⁸.

Donde:

N_B = Velocidad del agitador a escala bench [rev/min] o [rpm]

N_L = Velocidad del agitador a escala laboratorio [rev/min] o [rpm]

$n = \frac{2}{3}$ para igual transferencia de masa (lo que equivale a igual potencia por volumen unitario).

4. Al conocer N_B , la potencia necesaria puede determinarse usando la ecuación (32), donde primeramente se determina el número de Reynolds por semejanza dinámica donde las fuerzas en puntos homólogos han de ser semejantes $Re_L = Re_B$ y el número de potencia se determina mediante la figura 37 en función del número de Reynolds.
5. Para aumentar la escala del reactor de laboratorio a bench, considerando las propiedades del fluido y las condiciones del sistema ya escalado, los tiempos de lixiviación se relacionan mediante:

⁹⁸ (Geankoplis, 1998)

$$\frac{t_B}{t_L} = \left(\frac{D_{aB}}{D_{aL}}\right)^{\frac{11}{18}} \quad (42)$$

Donde:

t_L = tiempo de lixiviación a escala laboratorio[s]

t_B = tiempo de lixiviación a escala Bench[s]

D_{aL} =diámetro del agitador a escala laboratorio[cm]

D_{aB} =diámetro del agitador a escala Bench[cm]

4.11.1. Determinación de las dimensiones del reactor a escala bench

De la tabla 15 Proporciones geométricas para un sistema de agitación se determinó el diámetro del reactor a escala bench mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{D_{aB}}{D_{RB}} = \frac{1}{3}$$

Donde:

D_{aB} =diámetro del agitador a escala Bench[cm]

D_{RB} = diámetro del reactor a escala Bench[cm]

Despejando el diámetro del reactor a escala bench:

$$D_{RB} = 3 D_{aB}$$

Por lo cual la altura del recipiente se calculó mediante la siguiente formula:

$$L_{RB} = \frac{4 * V_{RB}}{\pi * D_{RB}^2} \quad (43)$$

Donde:

L_{RB} = altura del reactor a escala bench[cm]

V_{RB} = volumen del reactor a escala bench[cm³]

D_{RB} = Diámetro del reactor a escala bench[cm]

4.12. Análisis de Transferencia de calor del reactor a escala bench

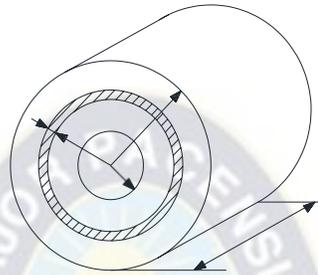
Se realizó un análisis de transferencia de calor para el reactor a escala bench, donde se propone el uso de una chaqueta calefactora para calentar el reactor hasta la temperatura de 70°C, para lo cual se calculó el calor adicionado al sistema, al ser una reacción exotérmica se propone un sistema de enfriamiento, mismo que puede ser un serpentín, chaqueta o camisa.

4.12.1. Calor entregado al reactor

El calor entregado al sistema será a partir del uso de una chaqueta calefactora. La transferencia de calor de la chaqueta calefactora al reactor será por conducción a través de una pared curva, para este tipo de cálculo se considera un cilindro en el cual la temperatura

en el interior del recipiente es T_1 , la temperatura en el exterior es T_2 y su conductividad térmica es $k_{ac\ inox}$. El calor en este caso fluye de manera radial, del exterior al interior, una cantidad de calor pasa a través del área del cilindro. Se considera una delgada capa de espesor dr y de radio r . El área de transferencia de calor de esta superficie cilíndrica será $2\pi rL$, entonces:

Figura 17 conducción a través de una superficie curva



Fuente: elaboración propia

$$Q_E = -k_{ac\ inox} 2\pi rL \frac{dt}{dr} \quad (44)$$

Integrando las variables:

$$Q_E \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi rL k_{ac\ inox} \int_{T_1}^{T_2} dt \quad (45)$$

$$Q_E \ln \frac{r_2}{r_1} = 2\pi rL k_{ac\ inox} (T_1 - T_2) \quad (46)$$

Aplicando la definición de resistencia térmica se tiene:

$$R_t = \frac{\Delta t}{Q_E} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_{ac\ inox} L} \quad (47)$$

Despejando el calor entregado al sistema tenemos:

$$Q_E = \frac{T_1 - T_2}{R_t} \quad (48)$$

Donde:

Q_E = calor entregado al sistema [W]

T_1 = Temperatura en el interior del reactor [°C]

T_2 = Temperatura en el exterior del reactor [°C]

r_1 = radio interno del reactor [cm]

r_2 = radio externo del reactor [cm]

k_{acinox} = coeficiente de conductividad térmica del acero inoxidable 316L (Anexo F)

e_{acero} = espesor de plancha de acero 1.5mm⁹⁹.

el material recomendado será de acuerdo a las condiciones a las que se encuentran el reactor, es decir la reacción de lixiviación se lleva a cabo a una temperatura de 70°C donde la presión interna no es significativa ya que la generación de vapor es mínima.

Descripción del material del reactor

En el mercado existen más de 70 aleaciones de acero inoxidable, y las cuales tienen como característica que son resistentes al calor y a la corrosión. Este tipo de aleaciones se dividen en martensíticos, los cuales contienen entre 12 a 20 % de Cromo (Cr). Los ferríticos contienen de un 15 a 30 % de Cr con bajo contenido de Carbono C y por último los austeníticos, los cuales contienen además de Cr cierta cantidad de níquel, lo cual los hace tenaces y dúctiles a la vez¹⁰⁰.

Para el presente estudio se recomienda el acero inoxidable 316L, el cual es del tipo austeníticos. Este material contiene entre un 16 a 18 % de Cr, 10 – 14 % de Ni, 3 % de Molibdeno (Mo), 0,08 % de C, 1 % de Silicio (Si) y 2 % de Manganeso (Mn), y es capaz de soportar un fluido corrosivo (ácido sulfúrico) y temperaturas elevadas (aproximadamente 300°C)¹⁰¹. Para el 98,5% de ácido sulfúrico, el límite es de 70°C¹⁰².

Nota: el material acero inoxidable 316L solo es recomendado para el reactor a escala bench y no así para el reactor a escala laboratorio que es de vidrio.

4.12.2. Calor generado por la reacción

Al ser una reacción exotérmica puede producirse una elevación súbita de la temperatura, y con el fin de mantener una temperatura constante se utilizará un sistema de enfriamiento mismo que puede ser una chaqueta que cubra la superficie exterior del reactor, o un serpentín de enfriamiento instalado en el interior del reactor. Para el presente estudio el sistema de enfriamiento seleccionado para el reactor es un serpentín, ya que, a diferencia de una camisa o chaqueta, es más eficiente y permitirá una mayor circulación de agua de enfriamiento en caso de producirse un aumento súbito en la temperatura del reactor.

El balance de energía permite calcular la cantidad de calor que debe ser retirado del interior del reactor y el flujo de agua necesario, por lo que el calor acumulado en un reactor isotérmico, es la siguiente:

$$Q_{Acumulado} = Q_{Ingresa} - Q_{Sale} + Q_{genera} - Q_{Consume} \quad (49)$$

⁹⁹ (Almendariz Llanos & Lara Gavilanes, 2014)

¹⁰⁰ (ROSETO ANDRADE, 2015)

¹⁰¹ Ficha técnica del acero inoxidable

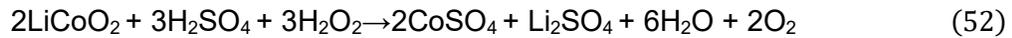
¹⁰² (Ultrilla Esteban , 1995)

$$Q_{genera} = Q_{sale} \quad (50)$$

La reacción es exotérmica a presión constante, por lo que la variación de entalpía del sistema es igual a la energía liberada en la reacción:

$$Q_{genera} = \Delta H^{70^{\circ}C} \quad (51)$$

En este caso, tendremos condiciones de operación a una temperatura de 70°C regido por la siguiente reacción:



Donde:

$\Delta H_{reacción} = -423,5 \text{ KJ}$ (determinado con el software HSC Chemistry 6.0 para el óxido de litio cobalto para la temperatura de 70 °C ver Anexo B)

$$M_{\text{LiCoO}_2} = 97,87 \text{ g/mol}$$

En el reactor de lixiviación, El calor generado por la reacción " Q_{genera} " indica la cantidad de calor que requiere ser retirado del sistema para mantener la operación del reactor a 70 °C siendo este el valor más adecuado para la lixiviación del cobalto, el cual fue determinado mediante pruebas de laboratorio realizada en el proyecto de grado "Recuperación de cobalto a partir de baterías de ion litio recicladas provenientes de teléfonos móviles de la ciudad de La Paz" de 2022. Por lo que se calculara con la finalidad de conocer el calor que se desprende de la reacción a una escala bench.

Por lo tanto, el calor generado por la reacción es igual a:

$$Q_{genera} = 9606 \text{ g} * \frac{1 \text{ mol}_{\text{LiCoO}_2}}{97,87 \text{ g}} * \frac{-423,5 \text{ KJ}}{2 \text{ mol}_{\text{LiCoO}_2}} = -20783 \text{ KJ}$$

A continuación, se determina la cantidad de vueltas del serpentín en el reactor:

$$N_s = \frac{L_{RB}}{D_{serpentin}} \quad (53)$$

Cálculo de la longitud del serpentín:

$$L_{serpentin} = N * \frac{2\pi D_{RB}}{2} \quad (54)$$

Con la siguiente ecuación se determinará el área del serpentín:

$$A_{serpentin} = \frac{\pi d_{serpentin}^2}{4} \quad (55)$$

Donde:

N_s = Cantidad de vueltas del serpentín en el reactor [rev/min] o [rpm]

L_{RB} = longitud del reactor a escala bench [cm]

$A_{serpentin}$ = área del serpentín [cm²]

$d_{serpentin}$ =diámetro del serpentín[cm]

Utilizando la siguiente ecuación para determinar el flujo volumétrico del agua:

$$Q_{H2O} = A_{Circulación} * v_{Circulación} \quad (56)$$

Donde:

Q_{H2O} = flujo volumétrico del agua[m³/s]

F_{H2O} = flujo másico del agua[kg/s]

$v_{Circulación}$ =velocidad de circulación [m/s]

Donde la velocidad de circulación del agua recomendada para una correcta selección debe estar dentro del rango admisible que es $0,6 < v < 2,4 \text{ m/s}$ ¹⁰³. Utilizando un valor de 0,6 m/s para la velocidad de circulación.

A partir del flujo volumétrico se determinará el flujo másico de agua requerido. Teniendo el tiempo de lixiviación a escala bench se determinará la masa requerida de agua para retirar el calor generado por la reacción dentro del reactor.

una vez realizado el balance de energía en el reactor, determinada la cantidad de calor que se requiere retirar del interior del mismo, y realizado los cálculos necesarios, se utilizó las ecuaciones (54) y (53) para la estimación de la temperatura de salida del agua y la cantidad de calor retirado del reactor por unidad de tiempo respectivamente y la ecuación (55) (ley de enfriamiento de Newton) para la estimación del coeficiente de transferencia de calor U .

$$Q_{genera} = m_{H2O} C_{p_{H2O}} (T_{ss} - T_{es}) \quad (57)$$

Despejando la temperatura de salida del serpentín:

$$T_{ss} = T_{es} + \frac{Q_{genera}}{m_{H2O} C_{p_{H2O}}} \quad (58)$$

Donde:

Q_{genera} =calor de la reacción [W]

m_{H2O} = flujo de agua requerido para el enfriamiento[kg]

$C_{p_{H2O}}$ = capacidad calorífica del agua $\left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right]$

T_{ss} = temperatura de salida del agua[°C]

T_{es} =temperatura de entrada del agua[°C]

$$Q_{retirado} = U * A_{total} * LMTD \quad (59)$$

Donde el área total de transferencia entre el reactor y el serpentín se puede calcular mediante la ecuación:

¹⁰³ (Almendariz Llanos & Lara Gavilanes, 2014)

$$A_{total} = L_{serpentin} * \frac{2*\pi*d_{serpentin}}{2} \quad (60)$$

La temperatura media logarítmica conocido también como $(LMTD)^{104}$ por sus siglas en ingles se puede calcular tomando en cuenta que se tiene la temperatura de ingreso y salida del agua del serpentín de enfriamiento y la temperatura del reactor que se mantiene constante.

$$LMTD = \frac{T_{SS} - T_{ES}}{\ln\left(\frac{T_1 - T_{ES}}{T_1 - T_{SS}}\right)} \quad (61)$$

Donde:

U = coeficiente global de transferencia de calor $\left[\frac{W}{m^2\cdot^{\circ}C}\right]$

A_{total} = área total de transferencia de calor $[m^2]$

$LMTD$ = temperatura media logarítmica $[^{\circ}C]$

T_{SS} = Temperatura de salida del agua del serpentín $[^{\circ}C]$

T_{ES} = Temperatura de entrada del agua al serpentín $[^{\circ}C]$

T_1 = Temperatura en el interior del reactor $[^{\circ}C]$

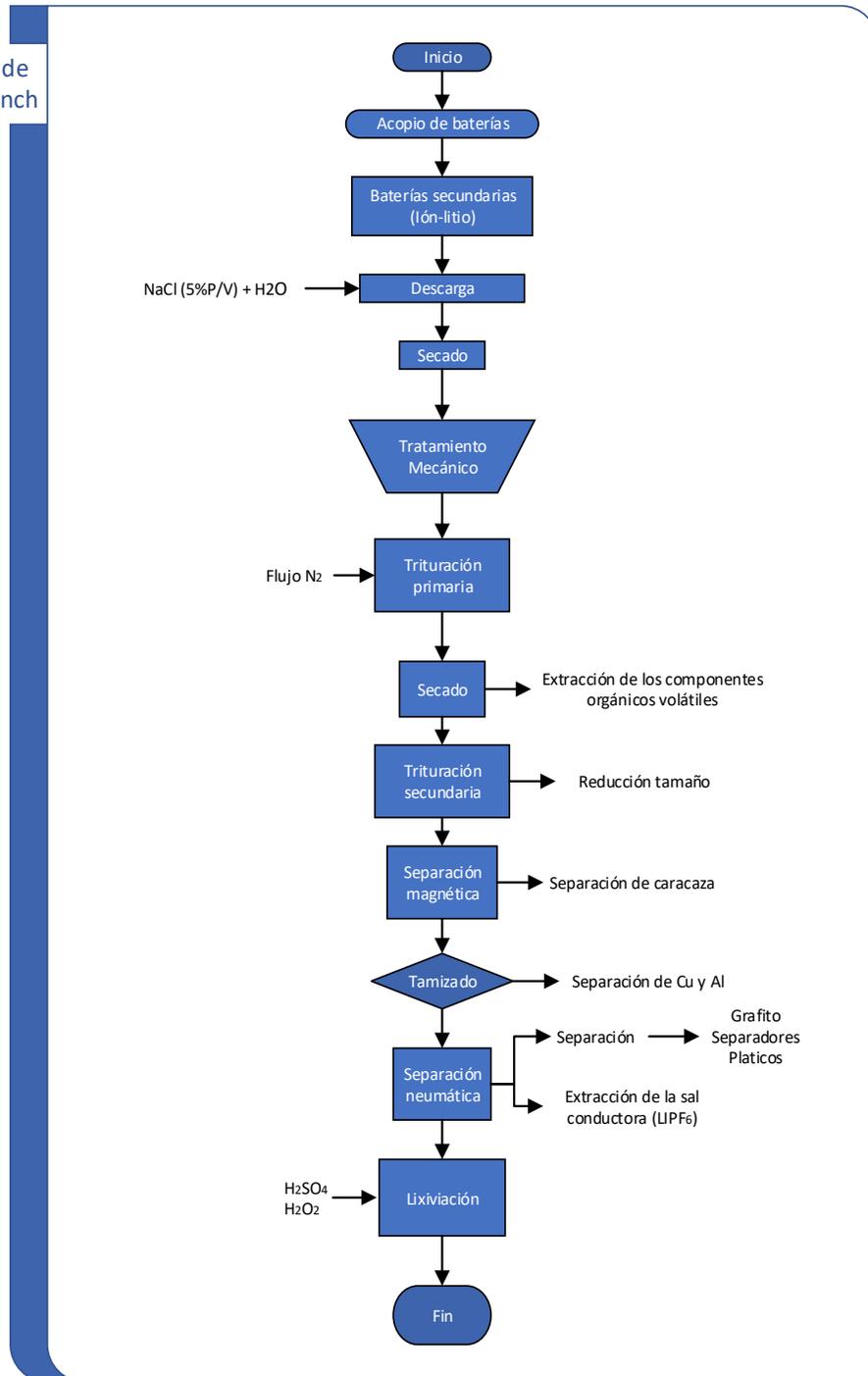
4.13. Proceso para la recuperación de cobalto de las baterías de ion litio a Escala Bench

El proceso que se plantea a escala bench esta direccionado a la recuperación del cobalto presente en las baterías de ion litio de teléfonos móviles al final de su vida útil, a diferencia de una escala laboratorio donde el proceso para obtener el material catódico fue de forma manual, será reemplazado por un proceso mecánico. A través de una revisión bibliográfica profunda para determinar los procesos de recuperación, se propone el proceso para la recuperación del cobalto de las baterías de ion litio de la siguiente manera:

¹⁰⁴ (Almendariz Llanos & Lara Gavilanes, 2014)

Figura 18 Diagrama del proceso para la recuperación de cobalto de las baterías de ion litio a Escala Bench

Proceso de escala bench



Fuente: elaboración propia

En la figura se muestra el diagrama del proceso desarrollado para las baterías de ion-litio en donde la recuperación del cobalto constituyente de las baterías de ion litio consta de varias etapas para obtener el materia catódico, para posteriormente realizar la lixiviación acida.

4.13.1. Acopio de las baterías

Se plantea acopiar las baterías ion-litio provenientes de teléfonos móviles del municipio de La Paz mediante:

La realización de convenios con instituciones públicas y privadas que trabajen con residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

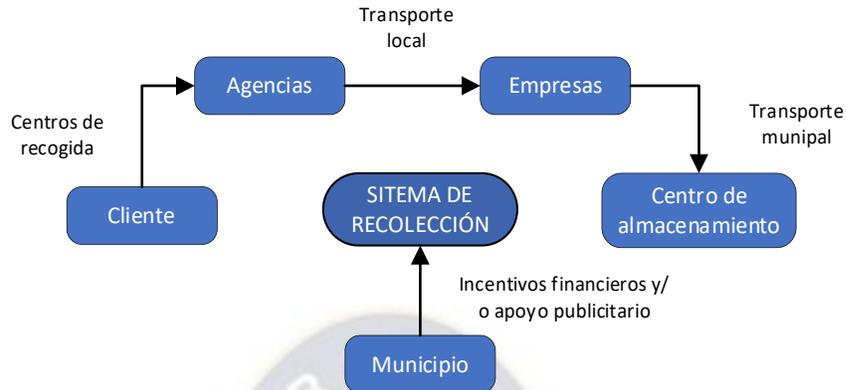
4.13.1.1. Recolección y Transporte

Los sitios de recolección de las baterías usadas se deben ubicar en lugares que sea fácilmente accesibles establecidas estratégicamente a las personas o empresas que deseen participar, tomado en cuenta los puntos de acopio establecido por la GIRS dependiente del GAML P y los convenios con empresas u ONGs. Se pueden utilizar la modalidad de minoristas que incluye todas las tiendas que venden teléfonos celulares, así como los talleres de servicio técnico y agencias comerciales de las empresas de telefonía celular. Los minoristas que participan en el programa deben poseer en sus instalaciones contenedores para la recolección de las baterías, los cuales son buzones metálicos con su interior recubierto con planchas de polietileno expandido para amortiguar el golpe de las baterías al ser depositadas, y evitar así su deterioro¹⁰⁵.

Es posible utilizar las movi lidades de recolección del municipio actual, Los centros de recolección minoristas se encargan de recibirlas y luego enviarlas a centros de recolección a nivel local bajo la responsabilidad de las empresas de celulares actuales, sin embargo en esta modalidad la logística de recolección implicara un aumento de costos en esta etapa, para ello el municipio puede coadyuvar en la disminución de algunos impuestos o dando una manera de promoción a las empresas participantes.

¹⁰⁵ (Correia de Soto & Martín de Armando, 2005)

Figura 19 Esquema de recolección diferenciada



Fuente: Elaboración Propia

4.13.2. Descripción del proceso

A escala laboratorio la cantidad producida tiene un valor por debajo de 1 kg/día, mientras que a escala bench se tiene una producción que va desde 1 kg/día hasta 20 kg/día, a nivel planta piloto la cantidad producida va desde 20 kg/día hasta 100 kg/día y finalmente la producción a escala industrial de 100 kg/día en adelante¹⁰⁶.

Teniendo esto en cuenta el presente estudio se centra en una planta de reciclaje a escala bench, que tendrá una capacidad de procesado de 10 toneladas de baterías al año. Consideremos que la planta de reciclaje funcionará 330 días al año y cada jornada laboral será de 12 horas. Asimismo, se asume que la planta opera a una temperatura ambiente de 15 °C aproximadamente y la presión atmosférica de La Paz (0,66 bar).

El proceso se divide en dos partes siendo el primero un proceso físico que consiste en la separación de los distintos materiales para obtener el material catódico donde se encuentra el cobalto (metal de interés) y, la segunda, está centrada en un proceso químico hidrometalúrgico. El proceso comienza con la recepción de las baterías ya extraídas de los teléfonos celulares. Antes de iniciar con el proceso de separación las baterías serán descargadas de cualquier excedente de energía para la seguridad de los operarios en las etapas siguientes, como se muestra a continuación:

4.13.2.1. Descarga de las baterías

Primeramente, las baterías ingresan al proceso de descarga, por lo que serán sumergidas en una solución acuosa de cloruro de sodio (NaCl) al 5% p/v a temperatura ambiente durante 5 días para poder descargar el remanente de la carga de la batería. De esta manera se

¹⁰⁶ (Zlokarnik. , 2006)

puede evitar la explosión de las baterías por contacto entre electrodos y asegurar la manipulación de las mismas en las etapas posteriores de reciclado¹⁰⁷.

4.13.2.2. Secado de las baterías

Una vez que se aseguró la descarga de la batería el secado será realizado en un horno durante 12 horas a 80°C para tener un secado completo de las baterías¹⁰⁸.

4.13.3. Tratamiento mecánico

Primeramente, las baterías serán sometidas a un tratamiento físico o mecánico que tiene como objetivo principal retirar los materiales de menor interés (carcasa exterior, separadores, plásticos, placas de cobre y aluminio), por medio de mecanismos que liberan, clasifican y concentran los materiales de interés, es decir el material catódico para el presente proyecto donde se encuentra el metal cobalto. El proceso será mediante conminución, siguiendo los lineamientos de un proceso de disminución de tamaño por medios mecánicos alterando su estado físico, pero sin alterar su estructura química⁽¹⁰⁹⁾⁽¹¹⁰⁾.

4.13.3.1. Características y especificaciones del equipo y maquinaria

Primeramente, antes de iniciar la descripción de cada etapa del proceso tenemos que especificar la maquinaria y equipo que se utilizara en la planta a escala bench, para esto se conoce la planificación de producción a realizar anualmente, entonces tenemos los siguientes equipos:

1) Horno de secado

Las baterías serán sometidas a secado como se mencionó anteriormente, para lo cual se muestra a continuación las especificaciones del equipo:

Tabla 17 especificaciones - secador

Descripción	
	El horno de secado al vacío está diseñado especialmente para el secado de material termosensible o descompuesto y oxidativo fácilmente, se puede rellenar con gases inertes, lo cual es especialmente para un secado rápido de algún material

¹⁰⁷ (Harper, y otros, Publisher Correction: Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles., 2020)

¹⁰⁸ (Maldonado Velásquez, 2019)

¹⁰⁹ (Kaya, Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes., 2016)

¹¹⁰ (Sánchez Echeverri, Betancur Pulgarín, & Ocampo Carmona, Conminución y análisis granulométrico para un proceso de recuperación de cobalto a partir de baterías de teléfonos móviles, 2016)

	compuesto. Es especialmente adecuado para el secado rápido y eficiente de componentes sensibles al calor, la oxidación y componentes complejos.
Potencia nominal	0,4KW
Tensión	220V
Tamaño del producto	300*300*275mm
Rango de temperatura	10-200°C
Capacidad	24L

Fuente: Elaboración propia con datos de catálogo de maquinaria XINYUANDA DRYING OVEN

Figura 20 Secador para la planta escala bench



Fuente: Catálogo de maquinaria XINYUANDA DRYING OVEN

2) Trituración primaria de las baterías

En esta primera etapa las baterías serán sometidas a una trituración por corte a través de una trituradora de martillos, de manera que queden en pequeños trozos y el interior de estas quede expuesto¹¹¹. Para llevar a cabo este proceso, se utiliza una trituradora de martillos, capaz de reducir las baterías a trozos más pequeños. A continuación, se muestran en la tabla, las especificaciones del equipo.

¹¹¹ (Ruan & Xu, 2016)

Tabla 18 especificaciones – trituradora de martillo

Descripción	La trituradora de martillo romper el metal útil del mineral, dependiendo del requisito de la fábrica, puede triturar las partículas minerales en malla 1 a 180.
Material	Acero inoxidable
Potencia nominal	6.5 KW
Tamaño de alimentación	Menor 30mm
Tamaño de descarga	Menor 1mm
Modelo	300*500
Capacidad	0,1 a 0,8 t/h
Dimensiones	630*380*630mm

Fuente: Elaboración propia con datos de catálogo de maquinaria Jiangxi Victor International Mining Equipment Co., Ltd

Nota: la capacidad del equipo va de 0,1 a 0,8 t/h ya que se tratarán 10 toneladas de baterías de ion litio al año, lo que al día sería 0,03 t/día, y 0,0025 t/h. se escogió este equipo al ser el más adecuado a escala bench.

Figura 21 Trituradora de matillo para la planta escala bench



Fuente: Catálogo de maquinaria Jiangxi Victor International Mining Equipment Co., Ltd

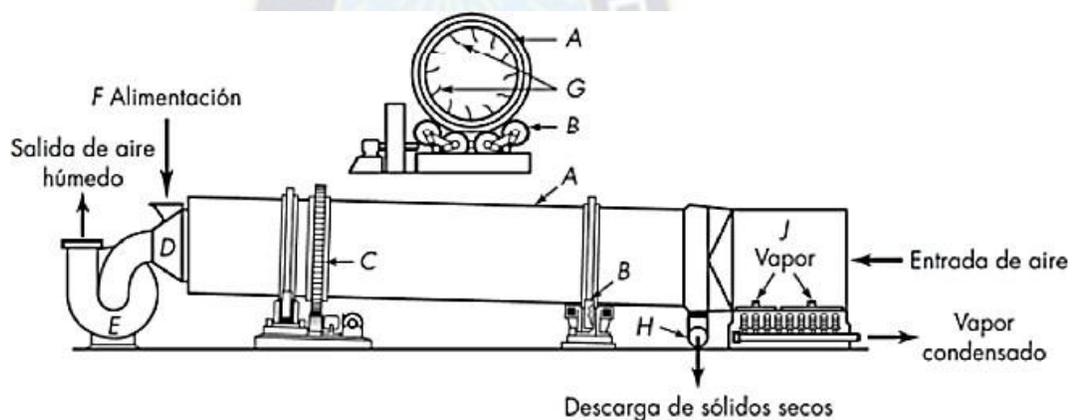
Se introducirá una corriente de nitrógeno para lograr una atmósfera inerte, para evitar la explosión de los componentes orgánicos del electrolito¹¹².

3) Secado

El objetivo de esta etapa es separar los componentes orgánicos volátiles presentes en el electrolito del resto de los componentes de la batería de ion litio. Para ello, se escoge un secador rotatorio, adecuado para materiales de tipo granular¹¹³.

Como puede apreciarse en la Figura de abajo, este equipo consiste en una carcasa cilíndrica giratoria, dispuesta horizontalmente y ligeramente inclinada hacia la salida, para facilitar la caída de los materiales.

Figura 22 esquema del secador rotatorio empleado



Fuente: (McCabe , Smith, & Harriott, 2007)

Por lo tanto, los flujos que intervienen en esta etapa son, por un lado, el flujo de aire caliente y de baterías trituradas como alimento y, a la salida, el flujo de aire húmedo, las baterías trituradas sin componentes orgánicos volátiles y, por último, un flujo con los componentes orgánicos volátiles.

4) Trituración secundaria

Una vez separado los componentes orgánicos volátiles y obtener el material seco, ésta ingresa a una segunda etapa de triturado, con el fin de reducir aún más su tamaño. Este segundo proceso de reducción de tamaño tiene como objetivo facilitar la separación de componentes en la etapa de tamizado que se realizara más adelante, dado que ésta se basa

¹¹² (Grützke, y otros, 2015)

¹¹³ (McCabe , Smith, & Harriott, 2007)

en la diferencia de tamaño de las partículas. Por ello, se puede afirmar que el flujo de material alimentado a esta etapa es el mismo que el que la abandona.

Para llevar a cabo la disminución de tamaño, se escoge un molino de bolas. A continuación, en la tabla de abajo se muestra las especificaciones del equipo escogido:

Tabla 19 especificaciones – Molino de bolas

Descripción	Funcionamiento estable, alta eficiencia, bajo ruido y sin contaminación, está disponible para molienda seca o húmeda, la máquina es adecuada para molienda áspera y fina, y también se puede aplicar a los materiales de mezcla. La máquina está auto equipada con dispositivo de vaciado, y tiene las ventajas de separar el polvo y los medios de bola automáticamente, es conveniente para la salida de polvo. es equipado con cubierta de seguridad, materiales de alta pureza y sin contaminación.
Material	Acero inoxidable
Potencia del motor	0,85 KW
Velocidad R/min	20-60
Capacidad	10 L
Malla	Menor a 300
Máximo tamaño de alimentación mm	10 mm

Fuente: Elaboración propia con datos de catálogo de maquinaria Changsha Yonglekang Equipment Co., Ltd

Figura 23 Molino de bolas para la planta escala bench



Fuente: Catálogo de maquinaria Changsha Yonglekang Equipment Co., Ltd

5) Separación magnética

Como su nombre lo indica esta separación se basa en la diferencia de propiedades magnéticas de los distintos materiales que componen las baterías de ion litio. Bajo estas condiciones, y considerando que la susceptibilidad magnética del acero es ($3 * 10^{-3114}$) superior al resto de los demás componentes como el aluminio ($1,65 * 10^{-6115}$), el cobre ($-8,21 * 10^{-7116}$) o el grafito ($-1,12 * 10^{-6117}$). Por lo que para esta etapa se utilizará un separador magnético de banda, compuesto por dos cintas transportadoras, colocadas la una sobre la otra. Como puede apreciarse en la Figura de abajo, en la cinta superior se dispone de un imán que permite que los materiales ferrosos se adhieran a la misma, siendo superior la fuerza de atracción magnética a la del peso de dichos materiales.

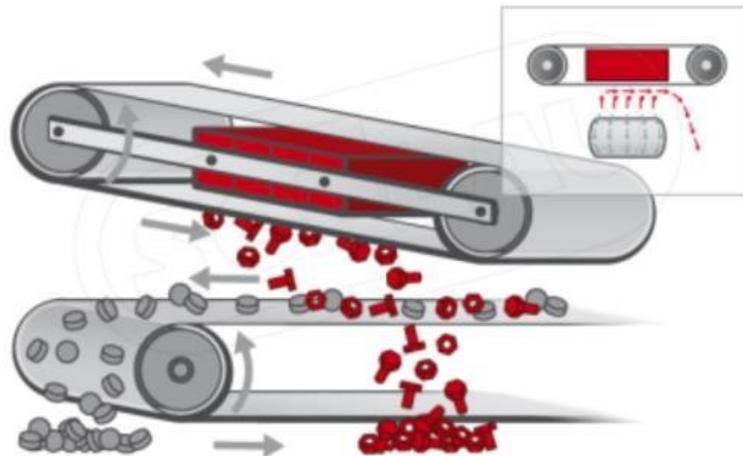
¹¹⁴ (Sgobba, 2010)

¹¹⁵ (Berger, y otros, 2014)

¹¹⁶ (Berger, y otros, 2014)

¹¹⁷ (Berger, y otros, 2014)

Figura 24 separador magnético de banda



Fuente: (Peña Torres, 2019)

En la figura de arriba las partículas de color gris representa el resto de materiales, que, al no verse retenidos por el imán, caen directamente y se desechan mientras que las partículas rojas representan al material ferroso.

El separado de banda cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 20 especificaciones – Separador magnético de banda

Descripción	separador magnético Diseñado con una fuerza magnética fuerte y estable se utiliza para separar la barra de hierro del flujo de material transportado por la correa. Su avanzado diseño y construcción la hacen ideal para su uso en reciclaje de residuos, trituración, minería, astillas de madera y aplicaciones de demolición.
Material	Acero inoxidable
Potencia del motor	1.5 KW
Anchura de banda	500 mm
Velocidad de transporte	Menor a 4.5 m/s

Fuente: Elaboración propia con datos de catálogo de maquinaria Qijin Magnet

Figura 25 separador de banda para la planta escala bench



Fuente: Catálogo de maquinaria Qijin Magnet

6) Tamizado

Separado la carcasa metálica del resto de los componentes, en esta etapa se separa las partículas de mayor tamaño, como el aluminio y el cobre de las partículas de menor tamaño mediante tamizado. En el segundo triturado se nota la diferencia de tamaño donde las partículas alcanzan un tamaño de tan sólo $106 \mu m$, mientras que el cobre y el aluminio presentan un tamaño mayor¹¹⁸.

Para llevar a cabo la separación del cobre y el aluminio, se escoge una criba de vibración rotatoria, cuyas Especificaciones se muestran en la Tabla de abajo:

Tabla 21 especificaciones – Tamizado

Descripción	
	Posterior a la separación del acero del resto de componentes, éstos se destinan a una unidad de tamizado, donde las partículas de mayor tamaño, como el aluminio y el cobre, se separan del resto, de menor tamaño. La diferencia de tamaño entre estos compuestos radica en el segundo proceso de triturado, gracias al cual el cobalto alcanza un tamaño de tan sólo $106 \mu m$, mientras que el cobre y el aluminio presentan uno mayor. Con el fin de separar correctamente el cobre y el

¹¹⁸ (Diekmann, y otros, 2017)

	aluminio, se escoge una criba de vibración rotatoria, concretamente el modelo cuyas características se muestran en la Tabla.
Material	Acero inoxidable
Potencia de calefacción	0,25 KW
Tiempo de tamizado	3-5min
Malla	2000-106 μm
Dimensiones	0,6m y 0,22m ²

Fuente: Elaboración propia con datos de catálogo Siehe Industrials SSZD-600.

Figura 26 Criba de vibración rotatoria para la planta escala bench



Fuente: catálogo Siehe Industrials SSZD-600.

Como se dijo anteriormente esta separación se logra gracias a la diferencia de tamaño que existe entre las partículas de estos dos metales (aluminio y cobre) del resto de componentes, que como máximo, y tal y como se ha expuesto anteriormente, presentan un tamaño de 106 μm .

7) Separación neumática

En esta etapa se procede a la separación del grafito, plásticos y separadores, ya que estos compuestos son parte del material de menor interés, por lo cual no interesan en la etapa de lixiviación. La separación neumática consiste en separar el material catódico mediante el uso de un flujo de aire ascendente en el equipo, donde los materiales con menor densidad (plásticos, separadores, grafito y la sal conductora del electrolito $LiPF_6$), se recuperan por la parte superior del equipo, mientras que los componentes de mayor densidad (metales contenidos en el cátodo) se recuperan por la parte inferior.

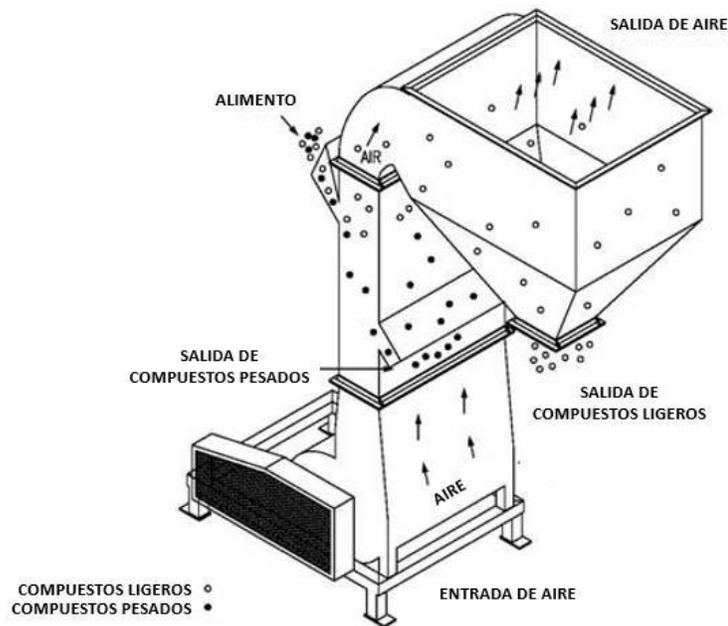
Para esta etapa se utilizará el equipo el cual permite la separación del material en función de sus densidades. En la tabla de abajo se muestra las especificaciones del equipo.

Tabla 22 especificaciones – Separación neumática

Descripción	Una vez separado el cobre y el aluminio del resto de materiales de interés, se procede a otra separación, esta vez del grafito y de los plásticos, dado que estos compuestos no interesan en la etapa hidrometalúrgica posterior. La separación neumática consiste en alimentar un equipo, por una parte, con la corriente cuyos compuestos interesa separar y, por otra, con una corriente de aire ascendente. De este modo, los materiales con menor densidad, como por ejemplo los plásticos y el grafito, se recuperan en la parte superior del equipo, mientras que los más densos se recuperan por la parte inferior. Dicho funcionamiento puede apreciarse en la Figura.
Material	Acero inoxidable
Potencia del motor	14,91 KW
Dimensiones	0,25*0,41*2,95 m

Fuente: Elaboración propia con datos de catálogo de la marca American International Manufacturing (AIM)

Figura 27 Esquema del separador neumático para la planta escala bench



Fuente: (AIM. Pneumatic Separator | American International Manufacturing Co. - Woodland, CA [en línea]. <http://www.aimfab.com/?page_id=272>)

Para esta etapa el flujo de entrada a la operación corresponde al material catódico, el grafito, la sal conductora del electrolito ($LiPF_6$), separadores y plásticos, principalmente. Los flujos de salida corresponden a una corriente de materiales livianos, principalmente compuesta por grafito, separadores, plásticos y la sal conductora del electrolito ($LiPF_6$), y una del material catódico. Además, se tienen las corrientes auxiliares correspondientes a la entrada y salida del aire. La alimentación ingresa al equipo por un costado a la sección principal. Por dicha sección circula el flujo ascendente de aire que retira las partículas de menor densidad por la parte superior, mientras que las de mayor densidad caen por la parte inferior del equipo. En la Figura de arriba se muestra un esquema del equipo de separación neumática.

8) Lixiviación

El objetivo de esta etapa es pasar el material catódico de las baterías de ion litio a una disolución acida, mediante el empleo de ácido sulfúrico y peróxido de hidrogeno. Para esta etapa se escogió un reactor discontinuo agitado de 10 L el cual fue escalado con los datos obtenidos a escala laboratorio y las condiciones de operación están expuestas en la siguiente tabla:

Tabla 23 condiciones de operación óptimas para la lixiviación de cobalto del material catódico de las baterías de ion litio recicladas

	H₂SO₄
Concentración del agente lixiviante	2 M
Concentración del agente reductor H₂O₂	10 % v/v
Temperatura operación	70 °C
Ratio sólido-líquido	100 g/L
Tiempo	6 h
% de Cobalto	86,53%
Agitación	173 rpm

Fuente: elaboración propia

A continuación, se muestra las especificaciones del reactor el cual te lo pueden hacer dependiendo al requerimiento:

Tabla 24 especificaciones – Reactor químico

Descripción	El equipo está dividido en un cuerpo del tanque, una tapa del tanque, una lechada agitadora, un puerto de alimentación, un puerto de descarga y una válvula de descarga. Estas piezas están hechas de acero inoxidable 316L resistente al ácido importado, y el tanque está pulido por dentro y por fuera de acuerdo con las condiciones técnicas de GMP. Hay un agitador en el tanque para agitar, la tapa es de tipo abierto, que se puede ensamblar, desmontar y limpiar. o puertos de alimentación adicionales para conectar a la tubería para añadir fácilmente reactivos.
Material	Acero inoxidable 316 L
Volumen	10 L
Velocidad de mezcla	173 rpm

Espesor de material	1,5 mm
Fuente de alimentación	220V/50Hz

Fuente: Elaboración propia con datos de catálogo de maquinaria JL- Zhengzho Jili Instrument Equipment Co., Ltd.

Figura 28 Reactor químico para la planta escala bench



Fuente: Catálogo de maquinaria JL- Zhengzho Jili Instrument Equipment Co., Ltd.

4.13.4. Cálculos del proceso de recuperación de cobalto de las baterías de ion litio a Escala Bench

Para la etapa de tratamiento mecánico, cuyo objetivo es obtener el material catódico se realiza el balance de masa para todas estas etapas, en base al cual se obtendrá los distintos flujos de material necesarios:

$$F_{salida} = F_{entrada} + F_{generado} - F_{consumido} - F_{acumulado} \left(\frac{ton}{año} \right) \quad (62)$$

Donde los flujos de generación y consumo son nulos, ya que no se dan reacciones químicas de ningún tipo. Para los balances de masa del proceso la acumulación es nula ya que se opera en régimen estacionario, por lo que la suma de los flujos de entrada es igual a la suma de los flujos de salida para todas las etapas del proceso mecánico o físico de las baterías:

$$0 = F_{entrada} - F_{salida} \quad (63)$$

Así, se tienen los valores mostrados en la Tabla de abajo para el flujo de entrada (F_{E0}) y de salida (F_{S0}) de la etapa de recepción y descarga de baterías.

Tabla 25 Balance de masa en la recepción y descarga de las baterías

Composición	F_{E0} TON/año	F_{S1} TON/año
LIBs	10	10

Fuente: elaboración propia

Para determinar la viabilidad económica de la planta, se emplea flujos referidos a un año de operación, pues será de mayor utilidad en las estimaciones de costos posteriores.

4.13.4.1. Trituración primaria de las baterías

El balance global está dado por la ecuación (62), donde no existen transformaciones químicas, por lo que los términos de generación y consumo son nulos. Además, se asume que el equipo opera en estado estacionario, por lo que el término de acumulación también desaparece. Así, la expresión para balance de masa de esta etapa, utilizando la nomenclatura de flujos del sistema.

$$0 = F_{ET1} + F_{EN_2} - F_{ST1} - F_{SN_2} \quad (64)$$

Las corrientes en esta etapa no se mezclan entre sí, por lo que mantienen sus magnitudes. Así, se tienen también las siguientes ecuaciones para el balance de masa en la etapa:

$$0 = F_{ET1} - F_{ST1} \quad (65)$$

$$0 = F_{EN_2} - F_{SN_2} \quad (66)$$

Donde:

F_{ET1} = flujo de entrada de la trituración primaria

F_{ST1} = flujo de salida de la trituración primaria

F_{EN_2} = flujo de entrada del nitrógeno

F_{SN_2} = flujo de salida del nitrógeno

En esta etapa existes dos flujos de entrada y dos de salida, correspondientes, por un lado, a la corriente de baterías, por otra parte, a la corriente de nitrógeno necesaria para que opere bajo una atmósfera inerte.

Primeramente, se determinará los flujos máscicos de cada componente de la batería, con el fin de conocer a detalle los flujos máscicos de cada uno de los componentes de las baterías, para lo cual se utilizará la composición de las baterías analizadas anteriormente, por lo que se muestra en la siguiente tabla con sus respectivas densidades:

Tabla 26 Composición y densidades de los componentes de una batería de ion litio

Componentes	Composición %	Densidad (g/cm³)
Carcasa	22,97	7,83 ¹¹⁹
Separadores y plásticos	11,25	0,94 ¹²⁰
Cátodo	31,70	4,58 ¹²¹
Aluminio	3,68	2,67 ¹²²
Grafito	25,44	2,23 ¹²³
Cobre	4,12	8,87 ¹²⁴
Componentes volátiles y sal conductora	0,84	1,11 ¹²⁵
Total	100	3,79

Fuente: elaboración propia

Nota: En este desglose de composiciones, se consideró la composición del electrolito (componentes orgánicos volátiles y la sal conductora), para explicar el proceso de cómo eliminarlos. Así mismo se determina los flujos másicos de cada uno de los componentes, para cálculos de etapas posteriores:

$$F_i = X_i * F_{total} \quad (67)$$

Donde:

F_i =flujo masico del componente i (Kg/h)

X_i =composición del componente i (%)

F_{total} =flujo másico total(Kg/h)

Por tanto, dado que conocemos el flujo de cada uno de los componentes de las baterías, se evaluará que cantidad de nitrógeno debe ingresar a esta etapa para mantener una atmosfera inerte durante el proceso de trituración. Primeramente, se determinará el volumen

¹¹⁹ (Robert & Don W. Green, 1997)

¹²⁰ (Sigma-Aldrich, Product Specification: Polyethylene, 2021)

¹²¹ (Robert & Don W. Green, 1997)

¹²² (Robert & Don W. Green, 1997)

¹²³ (Entegris, Graphite properties and characteristics)

¹²⁴ (Robert & Don W. Green, 1997)

¹²⁵ (Information, N.C.f.B., PubChem Compound Summary for CID 7924, Propylene carbonate.)

de la trituradora de martillos, en base a las especificaciones del fabricante, mediante la siguiente Ecuación:

$$V_{recipiente} = Largo * Ancho * Altura (m^3) \quad (68)$$

Entonces para determinar la cantidad de nitrógeno necesaria para operar en una atmósfera inerte, se emplea la siguiente Ecuación¹²⁶:

$$V_{N_2} = \ln \left(\frac{C_{O_2\ inicial}}{C_{O_2\ final}} \right) * V_{recipiente} \quad (69)$$

Donde:

V_{N_2} =volumen del N_2 gas inerte (m^3)

$C_{O_2\ inicial}$ =concentración inicial del gas a retirar (O_2) (%V/V)

$C_{O_2\ final}$ = concentración final del gas a retirar (%V/V)

$V_{recipiente}$ =volumen del equipo que contenga los gases (m^3)

Donde la concentración final de atmósfera inerte necesaria, para evitar la combustión de los compuestos orgánicos de las baterías, debe ser de 5% v/v de oxígeno¹²⁷. Para la concentración inicial del gas a retirar, equivale a la concentración del oxígeno en el aire, es decir, igual a 21% v/v.

Para determinar el flujo de nitrógeno, se utiliza la densidad promedio, calculada con la siguiente Ecuación, y utilizando los datos expuestos en la tabla (26):

$$\rho_{promedio} = \sum_i f_i * \rho_i \quad (70)$$

Donde:

$\rho_{promedio}$ =densidad de la mezcla ($\frac{Kg}{m^3}$)

f_i =composición del componente i, (%).

ρ_i =densidad del componente i ($\frac{Kg}{m^3}$)

Para determinar el flujo de nitrógeno es necesario conocer el tiempo de operación del equipo, por lo tanto, aplicando la Ecuación (71), teniendo en cuenta que, según las especificaciones del fabricante del equipo escogido, este puede operar con un flujo de alimentación de 0,8Ton/h:

$$t_{operación} = \frac{V_{recipiente}}{F} \quad (71)$$

¹²⁶ (LINDE. Inerting in the chemical industry)

¹²⁷ (Stanley, Englund, Laurence, & Daniel)

Finalmente se puede determinar el flujo másico necesario de nitrógeno para que el equipo opere en una atmosfera inerte dentro del equipo, si su densidad es $1,2506 \text{ Kg/m}^3$ ¹²⁸:

$$F_{N_2} = \frac{V_{N_2} * \rho_{N_2}}{t_{operación}} \quad (72)$$

4.13.4.2. Secado

El balance de masa global para la etapa de secado está dado por la ecuación (62). Donde los flujos de generación y consumo son nulos, ya que no se dan reacciones químicas de ningún tipo. Considerando que las etapas operan en régimen estacionario, se puede afirmar que tampoco existe acumulación, por lo que la suma de los flujos de entrada es igual a la suma de los flujos de salida. Así, se tiene la siguiente ecuación que representa el balance de masa en la etapa:

$$0 = F_{ET1} + FS_2 - F_{S3} - F_{S4} - FS_3 \quad (73)$$

Se asume que el aire solo sale del equipo por el flujo (FS_3). Así, se tienen también las siguientes ecuaciones para el balance de masa en la etapa.

$$0 = F_{ET1} - F_{SE} - F_{SEsal} \quad (74)$$

$$0 = FS_2 - FS_3 \quad (75)$$

El flujo de material húmedo (F_{ET1}) se alimenta por un extremo y por el extremo contrario ingresa el flujo de aire caliente (FS_2), para el secado. Por el extremo que ingresa el flujo de aire caliente sale el flujo de material seco (F_{SE}) (sin componentes orgánicos volátiles), y por el extremo que ingresa el material húmedo es retirado el aire húmedo (FS_3) en conjunto con los componentes orgánicos (F_{SEsal}) tras atravesar el equipo.

En base a la cantidad de componentes orgánicos volátiles de flujo alimentado se puede determinar la cantidad eliminada como un flujo aparte a la salida el equipo, así como la cantidad residual que se mantendrá en la corriente principal a la salida:

$$F_{volátilessalida} = \eta_{evaporación} * F_{volátilesentrada} \quad (76)$$

Donde:

$F_{volátilessalida}$ =flujo masico de volátiles recuperado a la salida (Kg/h)

$\eta_{evaporación}$ =eficiencia de la evaporación (70%)¹²⁹

$F_{volátilesentrada}$ =flujo masico de volátiles a la entrada (Kg/h)

De forma análoga, se puede determinar la cantidad de componentes volátiles residual mediante la siguiente ecuación:

¹²⁸ (Toolbox, T.E., Gases: Densities, 2021)

¹²⁹ (Stehmann, Bradtmöller , & Scholl, 2018)

$$F_{volátiles_{residual}} = (1 - \eta_{separación}) * F_{volátiles_{entrada}} \quad (77)$$

Después de calcular los flujos másicos de los componentes volátiles se determina el calor requerido y la cantidad de aire para evaporar los componentes volátiles, así como el flujo másico de las baterías a la salida de la etapa, pobre en compuestos volátiles.

Para estimar el calor requerido para calentar el aire a la entrada de este proceso, se aplica un balance de energía, como se muestra en la siguiente Ecuación:

$$q = \sum_i m_{sól_i} * Cp_{sól} * \Delta T_{sól} + m_{liq} * Cp_{liq} * \Delta T_{liq} + m_{evap} * \lambda + (m_{liq} - m_{evap}) * Cp_{liq} * \Delta T'_{liq} + m_{evap} * Cp_{evap} * \Delta T_{evap} \quad (78)$$

Donde:

$m_{sól_i}$ = flujo másico del sólido (Kg/h)

m_{liq} = flujo másico del líquido a evaporar (Kg/h)

m_{evap} = flujo másico del líquido evaporado (Kg/h)

$Cp_{sól}$ = calor específico del sólido (J/g * K)

Cp_{liq} = calor específico del líquido a evaporar (J/g * K)

Cp_{evap} = calor específico del líquido evaporado (J/g * K)

$\Delta T_{sól}$ = diferencia de temperaturas del sólido a la entrada y la salida (K)

ΔT_{liq} = diferencia de temperaturas del líquido entre entrada y ebullición (K)

$\Delta T'_{liq}$ = diferencia de temperaturas del líquido entre ebullición y salida (K)

ΔT_{evap} = diferencia de temperaturas del líquido evaporado entre salida y ebullición (K)

λ = calor latente de vaporización (J/g)

Para esta etapa, se asume que la temperatura de entrada es la misma que se ha fijado anteriormente para la planta de reciclaje, es decir la temperatura ambiente (15 °C). Asimismo, se considera que la temperatura de salida de los flujos es 10 °C superior a la temperatura de ebullición de los compuestos orgánicos volátiles¹³⁰, premisa que se considerará posteriormente para la determinación de la temperatura a la salida del equipo.

Para determinar el calor necesario en base a la Ecuación (78), es necesario conocer previamente los calores específicos de los diferentes componentes presentes en el equipo, así como sus respectivas temperaturas de ebullición y su calor latente de vaporización. Se ha realizado una búsqueda bibliográfica de dichas características de los compuestos del electrolito.

¹³⁰ (Peña Torres, 2019)

Primeramente, describiremos la composición del electrolito mediante un estudio profundo de bibliografía, el cual está compuesto de un líquido orgánico (peligroso por su carácter inflamable), siendo los componentes orgánicos volátiles, que incluye carbonato de propileno (PC), carbonato de etileno (EC), Carbonato de dietilo (C₅H₁₀O₃), Carbonato de dimetilo (DMC) y el Etil metil carbonato (EMC) y se emplea como soluto una sal de litio el hexafluorofosfato de litio LiPF₆¹³¹, el cual se retirará en la etapa de separación neumática, entonces las propiedades termodinámicas de los componentes orgánicos volátiles se resume mediante las siguientes tablas:

Tabla 27 Propiedades termodinámicas de los componentes del electrolito

Compuesto	Temperatura de ebullición (K)	Calor específico (J/g*K)	Calor latente de vaporización (J/g)
Carbonato de propileno	513,20 ¹³²	1,80 ¹³³	600,45 ¹³⁴
Carbonato de etileno	516,70 ¹³⁵	1,52 ¹³⁶	719,96 ¹³⁷
Carbonato de dietilo	400,40 ¹³⁸	1,79 ¹³⁹	369,08 ¹⁴⁰
Carbonato de dimetilo	363,54 ¹⁴¹	1,30 ¹⁴²	418,52 ¹⁴³
Etil metil carbonato	380,65 ¹⁴⁴	1,43 ¹⁴⁵	345,40 ¹⁴⁶

Fuente: elaboración propia

Sin embargo, también es de vital importancia conocer el calor específico que componen el flujo de baterías que se alimentan a esta etapa. En la Tabla de abajo se muestra los calores específicos restantes, necesarios para calcular el calor transferido en el equipo:

¹³¹ (Golmohammadzadeh, Rashchi, & Vahidi, 2017)

¹³² (Technology, N.I.o.S.a., Propylene Carbonate. , 2021)

¹³³ (Technology, N.I.o.S.a., Propylene Carbonate. , 2021)

¹³⁴ (Technology, N.I.o.S.a., Propylene Carbonate. , 2021)

¹³⁵ (Technology, N.I.o.S.a., 1,3-Dioxolan-2-one. , 2021)

¹³⁶ (Technology, N.I.o.S.a., 1,3-Dioxolan-2-one. , 2021)

¹³⁷ (Technology, N.I.o.S.a., 1,3-Dioxolan-2-one. , 2021)

¹³⁸ (Technology, N.I.o.S.a., Carbonic acid, diethyl ester. , 2021)

¹³⁹ (Technology, N.I.o.S.a., Carbonic acid, diethyl ester. , 2021)

¹⁴⁰ (Technology, N.I.o.S.a., Carbonic acid, diethyl ester. , 2021)

¹⁴¹ (Technology, N.I.o.S.a., Carbonic acid, dimethyl ester. , 2021)

¹⁴² (Technology, N.I.o.S.a., Carbonic acid, dimethyl ester. , 2021)

¹⁴³ (Technology, N.I.o.S.a., Carbonic acid, dimethyl ester. , 2021)

¹⁴⁴ (Chem, L., Ethyl methyl carbonate., 2021)

¹⁴⁵ (Chem, L., Ethyl methyl carbonate., 2021)

¹⁴⁶ (Chem, L., Ethyl methyl carbonate., 2021)

Tabla 28 Propiedades termodinámicas del resto de componentes de la corriente sólida alimentada.

Componentes	Calor específico (J/g*K)
Carcasa	0,502 ¹⁴⁷
Aluminio	0,902 ¹⁴⁸
Plástico (PE+PP)	(1,55 ¹⁴⁹ +1,92 ¹⁵⁰)/2=1,735
Cátodo	0,600 ¹⁵¹
Grafito	0,691 ¹⁵²
Cobre	0,386 ¹⁵³

Fuente: elaboración propia

Conocidos los parámetros del electrolito y de los demás componentes que ingresan a esta etapa, se determina la cantidad de masa necesaria de aire que ingresa en el equipo y su temperatura. Asumiendo que no existen pérdidas de calor dentro del mismo, es decir, que es un sistema adiabático.

$$m_{aire} = \frac{q}{Cp_{aire} * \Delta T_{aire}} \quad (79)$$

$$\Delta T_{aire} = T_{aire_{entrada}} - T_{aire_{salida}} \quad (80)$$

Donde:

m_{aire} =flujo masico de aire[kg/s]

Cp_{aire} =calor específico del aire ($J/g * K$)

ΔT_{aire} =diferencias de temperaturas de entrada y de salida del aire (K)

$T_{aire_{entrada}}$ =temperatura de entrada del aire (K)

$T_{aire_{salida}}$ =temperatura de salida del aire (K)

4.13.4.3. trituración secundaria

En esta etapa no es necesario trabajar en atmósfera inerte, pues los componentes orgánicos volátiles ya han sido eliminados mediante el secado expuesto anteriormente. Para este proceso se realiza el balance de masa general expuesto en la ecuación (62), por lo que el equipo opera en estado estacionario, entonces la acumulación es nula, entonces la

¹⁴⁷ (Robert & Don W. Green, 1997)

¹⁴⁸ (Robert & Don W. Green, 1997)

¹⁴⁹ (Gaur & Wunderlich, 1981)

¹⁵⁰ (Gaur & Wunderlich, 1981)

¹⁵¹ (Maleki, Hallaj, Selman, Dinwiddie, & Wang, 1999)

¹⁵² (Robert & Don W. Green, 1997)

¹⁵³ (Robert & Don W. Green, 1997)

corriente que ingresa a esta etapa es igual a la que la abandona y lo único que varía es el tamaño de las partículas.

4.13.4.4. separación magnética

Se realiza el mismo análisis para esta etapa, es decir se consideran los flujos de generación y consumo nulos, ya que no se dan reacciones químicas de ningún tipo. Considerando que las etapas operan en régimen estacionario, se puede afirmar que tampoco existe acumulación, por lo que la suma de los flujos de entrada es igual a la suma de los flujos de salida.

La finalidad de este proceso es la separación de la carcasa del resto de componentes gracias a la aplicación de un campo magnético a través del cual se atraen las partículas de acero, quedando retenidas por el imán. En tanto que los demás componentes, se recuperan por separado sin ser retenidos por el equipo. Por tanto, en esta etapa ingresa una única corriente, pero la abandonan dos.

$$0 = F_{ET2} - F_{SM} - F_{SMR} \quad (81)$$

El flujo de entrada a la operación corresponde al (F_{ET2}), y los flujos de salida son los componentes ferrosos (F_{SMR}) y materiales no ferrosos (F_{SM}).

Por lo que, para esta etapa, los cálculos se centran en la evaluación de la cantidad de acero que es posible recuperar como una corriente aparte a la salida del equipo. Para ello, se ha realizado una búsqueda de la eficacia de dicha separación para el acero, para la cual se ha encontrado un dato del 90%¹⁵⁴. Por tanto, puede establecerse el siguiente balance de masa:

$$F_{acero_{salida}} = \eta_{separación} * F_{acero_{entrada}} \quad (82)$$

Donde:

$F_{acero_{salida}}$ =flujo masico de acero recuperado a la salida ($\frac{TON}{año}$)

$\eta_{separación}$ =eficiencia de la separación magnética

$F_{acero_{entrada}}$ =flujo masico de acero alimentado a la entrada ($\frac{Kg}{h}$)

Asimismo, puede calcularse en una de las corrientes de salida la cantidad de acero residual:

$$F_{acero_{residual}} = (1 - \eta_{separación}) * F_{acero_{entrada}} \quad (83)$$

4.13.4.5. tamizado

Al igual que las anteriores etapas la operación es en régimen estacionario. Por tanto, no existen términos de generación ni acumulación en el balance de materia. Para determinar la

¹⁵⁴ (Svoboda, 1994)

cantidad de cobre que se elimina de la corriente principal y se recupera como una corriente aparte a la salida del equipo, se ha determinado, por bibliografía, que el proceso presenta una eficiencia de separación dependiente del material a separar.

$$0 = F_{ESM} - F_{Al+Cu} - F_{TA} \quad (84)$$

El flujo de entrada a la operación corresponde al (F_{ESM}), y los flujos de salida son el aluminio y cobre (F_{Al+Cu}) y el material tamizado (F_{SM}).

En el caso del cobre, se observa una eficiencia de separación del 88%¹⁵⁵ mediante bibliografía. Teniendo en cuenta este parámetro, se puede establecer el balance del cobre, tanto para el obtenido en corriente individual a la salida como para el que permanece de manera residual en la corriente principal:

$$F_{cobre\ salida} = \eta_{separación} * F_{cobre\ entrada} \quad (85)$$

$$F_{cobre\ residual} = (1 - \eta_{separación}) * F_{cobre\ entrada} \quad (86)$$

Donde:

$F_{cobre\ salida}$ = flujo masico de cobre recuperado a la salida $\left(\frac{Kg}{h}\right)$

$\eta_{separación}$ = eficiencia de la separación

$F_{cobre\ entrada}$ = flujo masico de cobre alimentado a la entrada $\left(\frac{Kg}{h}\right)$

$F_{cobre\ residual}$ = flujo masico residual $\left(\frac{Kg}{h}\right)$

Se procede de manera análoga para el aluminio. Mediante bibliográfica, el porcentaje de separación es de un 89%¹⁵⁶. Por tanto, conociendo la cantidad de flujo de aluminio que ingresa en esta etapa, se procede al cálculo del aluminio retirado como una corriente individual y del aluminio residual que permanece en el flujo de salida:

$$F_{aluminio\ salida} = \eta_{separación} * F_{aluminio\ entrada} \quad (87)$$

$$F_{aluminio\ residual} = (1 - \eta_{separación}) * F_{aluminio\ entrada} \quad (88)$$

Donde:

$F_{aluminio\ salida}$ = flujo masico de aluminio recuperado a la salida $\left(\frac{Kg}{h}\right)$

$\eta_{separación}$ = eficiencia de la separación

$F_{aluminio\ entrada}$ = flujo masico de aluminio alimentado a la entrada $\left(\frac{Kg}{h}\right)$

$F_{aluminio\ residual}$ = flujo masico residual $\left(\frac{Kg}{h}\right)$

¹⁵⁵ (Diekmann, y otros, 2016)

¹⁵⁶ (Diekmann, y otros, 2017)

4.13.4.6. Separación neumática

Para este proceso de régimen estacionario no intervienen los términos de generación y acumulación por lo que son despreciables. Se tiene que el balance de masa de la etapa queda representado por la siguiente ecuación:

$$0 = F_{TA} + F_{AE} - F_{SNR} - F_{SN} - F_{AS} \quad (89)$$

Tenemos al flujo de entrada procedente de la etapa de tamizado (F_{TA}), al flujo de aire que entra (F_{AE}), y los flujos de salida, donde se asume que el aire solo sale de la etapa por el flujo (F_{AS}), el flujo de los componentes retirados (F_{SNR}) y el material catódico (F_{SN}).

Asimismo, en esta etapa la principal función es separar el grafito y los plásticos, de menor densidad, del material catódico donde se encuentran los metales de mayor densidad. Mediante búsquedas bibliográficas, se ha determinado que la eficiencia de separación de dichos compuestos es de aproximadamente un 89%¹⁵⁷.

Teniendo en cuenta que la corriente principal por donde ingresa el material catódico, también contiene una pequeña cantidad residual de volátiles que no fueron eliminados en la etapa de secado, se asume que dicha cantidad residual por su elevada volatilidad va a eliminarse de la corriente principal arrastrados por la corriente de aire pues, como su nombre indica, tienen una elevada volatilidad.

Bajo estas premisas, debe calcularse es el requerimiento de aire que debe ingresar al equipo para lograr esta separación. Por lo que, se establece un balance de fuerzas para cada partícula a retirar:

$$m * a = F_a - m * g \quad (90)$$

Donde:

m =masa de la partícula (g)

a =aceleración de la partícula (m/s^2)

F_a =fuerza de arrastre (N)

g =aceleración de la gravedad (m/s^2)

Para lograr el arrastre de las partículas por la corriente de aire, es necesario que la fuerza de arrastre que las eleva sea superior a la fuerza peso que provoca su descenso, por lo que se fija como condición indispensable la siguiente ecuación:

$$F_a > m * g \quad (91)$$

Por lo que se fija la siguiente ecuación para determinar dicha fuerza de arrastre¹⁵⁸:

$$F_a = F_e + F_i \quad (92)$$

¹⁵⁷ (Eswaraiah, Khavita, Vidyasagar, & Narayanan, 2008)

¹⁵⁸ (Robert & Don W. Green, 1997)

Donde:

F_a = fuerza de arrastre (N)

F_e = fuerza de empuje del aire (N)

F_i = fuerza de interacción entre las partículas (N)

Se definen las siguientes ecuaciones para el cálculo de las fuerzas de empuje e interacción entre partículas:

$$F_e = \rho_{aire} * g * V_p \quad (93)$$

$$F_i = \frac{1}{2} * C_D * \rho_{aire} * A_p * v^2 \quad (94)$$

Donde:

F_e = fuerza de empuje del aire (N)

F_i = fuerza de interacción entre las partículas (N)

ρ_{aire} = densidad del aire (Kg/m³)

V_p = volumen de la partícula (m³)

C_D = coeficiente de arrastre de la partícula (adimensional)

A_p = área superficial de la partícula (m²)

v = velocidad del aire (m/s)

Tras definir todos los términos necesarios para resolver la desigualdad expuesta por la Ecuación 91, se puede definir la siguiente desigualdad, que permite determinar la velocidad necesaria del aire que ingresa a la etapa:

$$v > \sqrt{\frac{2 * g * (\rho_p - \rho_{aire}) * V_p}{C_D * \rho_{aire} * A_p}} \quad (95)$$

Con el fin de aplicar la ecuación se realiza una búsqueda de los distintos parámetros para poder resolverlo:

Tabla 29 Parámetros necesarios para calcular la velocidad del aire

Parámetro	Valor	Unidades
ρ_{aire}	1,23 ¹⁵⁹	Kg/m ³
ρ_p	2230 ¹⁶⁰	Kg/m ³
D_p	0,5*10 ⁻³¹⁶¹	m

¹⁵⁹ (Robert & Don W. Green, 1997)

¹⁶⁰ (Entegris, Graphite properties and characteristics)

¹⁶¹ (Eswaraiah, Khavita, Vidyasagar, & Narayanan, 2008)

g	9,775	m/s^2
C_D	0,5 ¹⁶²	-

Fuente: elaboración propia

A partir del diámetro de partícula expuesto en la Tabla de arriba, se puede calcular el área y el volumen de la misma, suponiendo que se trata de una esfera perfecta:

$$A_p = \pi * D_p^2 \quad (96)$$

$$V_p = \frac{\pi * D_p^3}{6} \quad (97)$$

Una vez determinada la velocidad a la que debe ingresar el aire alimentado, se puede proceder al cálculo final del flujo másico de aire requerido para esta etapa:

$$F_{aire} = \rho_{aire} * v * A_{equipo} \quad (98)$$

Finalmente se puede calcular los flujos resultantes del grafito, separadores y plásticos tanto en la corriente de aire que arrastra dichos compuestos como en la corriente principal, en la que queda una pequeña cantidad residual:

$$F_{grafito_{salida}} = \eta_{separación} * F_{grafito_{entrada}} \quad (99)$$

$$F_{grafito_{residual}} = (1 - \eta_{separación}) * F_{grafito_{entrada}} \quad (100)$$

$$F_{sep\ y\ plásticos_{salida}} = \eta_{separación} * F_{sep\ y\ plásticos_{entrada}} \quad (101)$$

$$F_{sep\ y\ plásticos_{residual}} = (1 - \eta_{separación}) * F_{sep\ y\ plásticos_{entrada}} \quad (102)$$

4.13.4.7. Lixiviación

A partir del proceso mecánico llevado a cabo anteriormente para obtener el material catódico ($LiCoO_2$), el mismo es alimentado a la etapa de lixiviación que consiste en una disolución lixiviante de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno. De esta forma, éstos reaccionan con el cobalto contenido en el material catódico. Se trata de una reacción heterogénea, expuesta en la reacción química siguiente:



Asimismo, con el fin de simplificar el análisis de los flujos másicos de todos los compuestos contenidos en el flujo de alimentación, se considera que todos aquellos materiales que no pertenezcan al cátodo no reaccionan.

Entonces la mayor eficiencia se obtiene a una temperatura de aproximadamente 70 °C, con una concentración inicial de 2 M y 10% en volumen de agente lixiviante y reductor,

¹⁶² (Robert & Don W. Green, 1997)

respectivamente; con agitación de 173 rpm y una ratio sólido-líquido de 100 g/L. Bajo estos parámetros, se obtienen una eficiencia de lixiviación elevada de 86,53%¹⁶³.

Teniendo el flujo de material catódico que se alimenta a esta etapa, calculamos el flujo de ácido sulfúrico y peróxido de hidrogeno:

$$F_{H_2SO_4} = F_{LiCoO_2} * \frac{\gamma_{H_2SO_4}}{\gamma_{LiCoO_2}} * \frac{M_{H_2SO_4}}{M_{LiCoO_2}} \quad (104)$$

$$F_{H_2O_2} = F_{LiCoO_2} * \frac{\gamma_{H_2O_2}}{\gamma_{LiCoO_2}} * \frac{M_{H_2O_2}}{M_{LiCoO_2}} \quad (105)$$

Seguidamente, calculamos los flujos consumidos anualmente de ácido sulfúrico y de peróxido de hidrógeno en la reacción de lixiviación:

$$F_{H_2SO_4} = F_{LiCoO_2} * \frac{\gamma_{H_2SO_4}}{\gamma_{LiCoO_2}} * X_{Co} * \frac{M_{H_2SO_4}}{M_{LiCoO_2}} \quad (106)$$

$$F_{H_2O_2} = F_{LiCoO_2} * \frac{\gamma_{H_2O_2}}{\gamma_{LiCoO_2}} * X_{Co} * \frac{M_{H_2O_2}}{M_{LiCoO_2}} \quad (107)$$

Donde:

F_i =Flujo de la especie i, $\left(\frac{TON}{año}\right)$

γ_i =coeficiente estequiométrico de la especie i.

X_{Co} =eficiencia de lixiviación del cobalto (86,53 %)

M_i =peso molecular de la especie i, $\left(\frac{g}{mol}\right)$

Una vez determinada la cantidad total de ácido que se alimenta a la lixiviación, se puede obtener la cantidad de agua que ingresa a la misma en base a la concentración del ácido y a la densidad del agua, que a la temperatura del proceso es de 997 Kg/m³¹⁶⁴:

$$F_{H_2O} = \frac{F_{H_2SO_4}}{C_{H_2SO_4} * M_{H_2SO_4}} * \rho_{H_2O} \quad (108)$$

Donde:

C_i =concentración del compuesto i $\left(\frac{mol}{L}\right)$

calculamos el flujo masico de cobalto lixiviado en base a la eficiencia de lixiviación:

$$F_{CoSO_4} = F_{LiCoO_2} * \frac{\gamma_{CoSO_4}}{\gamma_{LiCoO_2}} * X_{Co} * \frac{M_{CoSO_4}}{M_{LiCoO_2}} \quad (109)$$

$$F_{CoSO_4\ residual} = F_{LiCoO_2} * \frac{\gamma_{CoSO_4}}{\gamma_{LiCoO_2}} * (1 - X_{Co}) * \frac{M_{CoSO_4}}{M_{LiCoO_2}} \quad (110)$$

¹⁶³ (Peñaloza Pimentel, 2022)

¹⁶⁴ (Perry, 1997)



CAPITULO

V

5. Análisis de datos y evaluación de resultados

5.1. Resultados de la encuesta

Los resultados de la encuesta fueron detallados en el Anexo A, los cuales fueron interpretados en porcentaje totales de acuerdo a estratos socio-económicos.

Los datos obtenidos se encuentran detallados a continuación:

5.1.1. Presencia de Baterías de celular

Es evidente que mediante la encuesta el 100% de unidades familiares cuentan con celulares móviles, es decir que en el municipio de la ciudad de La Paz hay al menos una batería de ion-litio por cada miembro de la familia, En el supuesto caso de 4 habitantes en cada unidad familiar, se puede estimar un rango de 4 – 6 baterías de ion-litio generadas por hogar, considerando una variación de acuerdo al estrato socio-económico, puesto que la utilización de celulares móviles es mayor en relación a otros domicilios.

De acuerdo a los datos obtenidos respecto a la cantidad de celulares móviles que poseen en cada hogar fueron: de 1 a 4 se tiene un 45%, de 4 a 8 un 40%, y de 8 o más un 15%.

Dato respecto al consumo comercial, se tiene un 51% en comercio formal (importadoras autorizadas, con facturación), un 3% en importación directa (compra online), un 40% en comercio informal (sin facturación) y un 6% de segunda mano (conocidos, amigos y otros).

5.1.2. Generación de Baterías de ion litio

A partir de la información recabada con las encuestas, el nivel de penetración es de 2 baterías por habitantes, entonces el $p_t = 100\%$

De acuerdo a los resultados obtenidos, se establece que existen 5 baterías en los hogares en promedio, entonces: $a_t = 5$

De acuerdo a los resultados de las encuestas se tiene en promedio de vida útil de las baterías de ion litio en los hogares del Municipio de La Paz es: $V_u = 2$ años

Reemplazando todos estos datos en la ecuación (21):

$$\text{Generación} = \frac{205,676 \times 2 \times 5}{2}$$

$$\text{Generación} = 1028,38$$

Las baterías de celular en desuso pesan en promedio 29,87 gr o 0,02987 Kg (calculado en la Tabla 32) entonces la generación en toneladas será:

$$\text{Generación} = 30,72 \text{ TON}$$

Si tenemos una cantidad poblacional total de 822,705 habitantes, la generación de baterías per cápita corresponde a: 0,037 Kg/hab./año.

$$\text{Generación} = 0,037 \text{ Kg/hab./año.}$$

Generación Aproximada = 1 baterías/hab./año.

Esta evaluada con una variación estadística del 20% en la estimación de intervalos.

5.2. Resultados de la parte experimental

5.2.1. Acopio de las baterías

Se consiguió recolectar una cantidad de 481 baterías en total, totalizando una masa aproximada de 15 Kilogramos en total. Una vez que se tiene la cantidad necesaria de baterías se procedió a realizar la descarga de las baterías para evitar cortocircuitos o la combustión de la misma.

Figura 29 Baterías de ion litio recolectadas



Fuente: elaboración propia

5.2.2. Descarga de las baterías

Se sumergieron las baterías por aproximadamente una semana (5 días) en una solución de cloruro de sodio (NaCl) para garantizar la descarga completa de las baterías, evitando reacciones no deseadas y sobrecalentamientos durante el desmantelamiento. Durante el proceso de descarga se observó la formación de pequeñas cantidades de gas sobre la superficie de la solución, y el cambio de color de la solución salina de transparente a marrón esto puede atribuirse a algún tipo de reacción entre la solución salina y algún componente de la batería.

5.2.3. Secado de las baterías

El secado de las baterías se realizó durante tres días aproximadamente, hasta que no quede rastro de la solución salina.

Figura 30 secado de las baterías de ion litio



Fuente: elaboración propia

5.2.4. Caracterización y Clasificación de las baterías

Se evidencio que las baterías más utilizadas son de la marca Samsung. Mientras que las marcas LG, Nokia, Motorola y Alcatel son de menor cantidad como se ve en la siguiente tabla:

Tabla 30 Clasificación de las baterías de ion litio recicladas

Marca	Ion litio	Polímero	Total
Samsung	159	32	191
LG	16		16
Nokia	45		45
Sony	35		35
Sony Ericsson	36	7	43
Huawei	28		28
Motorola	6		6
Alcatel	6		6
Otros	99	12	111
TOTAL	430	51	481

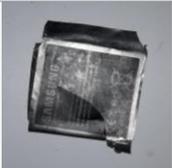
*Otros: marcas de baterías de ion litio poco comunes o desconocidas.

Fuente: elaboración propia

5.2.5. Desmantelamiento de las baterías

Una vez desmanteladas se separaron en sus componentes con el objetivo de obtener los elementos de la batería por separado, a saber, ánodo, cátodo, carcasa metálica y elementos restantes. En la siguiente tabla se hizo una caracterización cualitativa donde se identificaron los elementos que conforman de manera separada y una breve descripción de los mismos.

Tabla 31 Componentes de una batería

Imagen	elementos
	<p>Material externo: constituido por un foil compuesto de plástico y papel en el cual va la información de la batería como fabricante, referencia, condiciones de operación entre otros.</p>
	<p>Plásticos laterales de protección: por donde ocurre la entrada y salida de la corriente.</p>
	<p>Carcasa metálica: dentro de la cual se encuentran los electrodos la cual comúnmente es de aluminio, pero también pueden encontrarse carcasas en acero.</p>
	<p>Cátodo: se encuentra adherido a una placa de aluminio.</p>
	<p>Separador (membrana): elemento polimérico que separa al cátodo del ánodo.</p>
	<p>Ánodo: se encuentra adherido a una placa de cobre.</p>

Fuente: elaboración propia

Es importante resaltar que durante la apertura manual de las baterías se generaron vapores de carácter orgánico, posiblemente asociados a los adhesivos utilizados para fijar el material de los electrodos a los foils metálicos sobre los que estaban depositados y por ello que se hace necesario hacer dicho proceso ya sea en un lugar bien ventilado o dentro de una cámara de extracción, utilizando los equipos de protección personal adecuados. En el

caso nuestro se realizó en la cámara extractora de gases del laboratorio de análisis para determinación de demanda bioquímica de oxígeno del IIDEPROQ.

En la siguiente tabla se muestra la masa de los componentes de las baterías de ion litio desmanteladas en total y por unidad, donde se sacó una media aritmética para obtener la masa unitaria de cada componente.

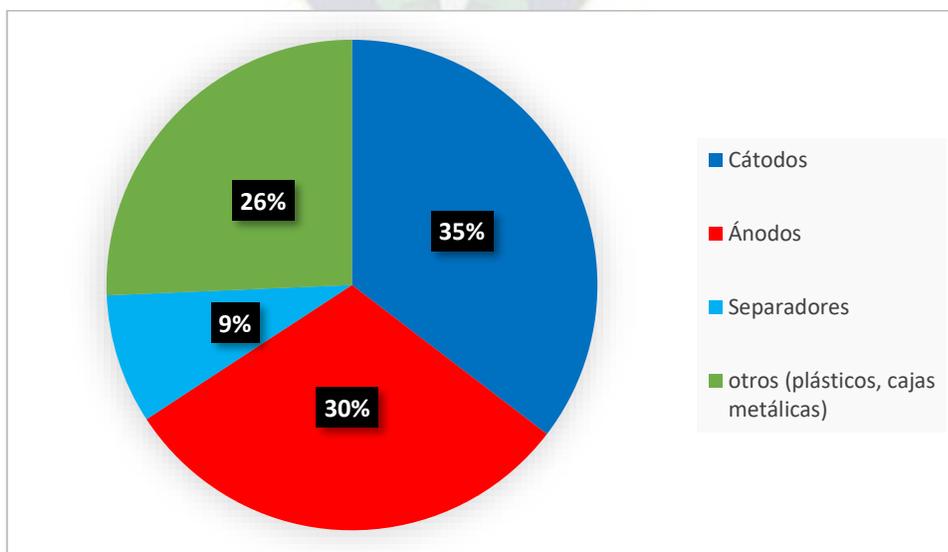
Tabla 32 Masa de los componentes de las baterías

Componentes	Masa	
	Total [kg]	Unidad [g]
Cátodos	4,81	10,57
Ánodos	4,13	9,08
Separadores	1,16	2,55
Otros (plásticos, cajas metálicas)	3,49	7,67
TOTAL	13,59	29,87

Fuente: elaboración propia

Mediante una caracterización cuantitativa en la siguiente figura se muestra la composición de las baterías de ion litio, donde el cátodo representa el 35 %, el ánodo el 30%, separadores 9% y otros (plásticos, cajas metálicas) 26% de una batería.

Figura 31 Composición de una batería de ion litio



Fuente: elaboración propia

5.2.6. Separación del material catódico

En total se lixivió una masa de 4810,75 g de cátodos en 14 L de solución de NaOH, ratio de 1:3 con agitación constante (100 rpm) y a temperatura ambiente.

Figura 32 separación del material catódico con una solución de NaOH



Fuente: elaboración propia

5.2.7. Filtración

La masa de material catódico húmedo fue de 4611,3 g

5.2.8. Secado

El tiempo de secado fue de 51 horas, teniendo una masa de 4311,8 g; teniendo una pérdida de 498,95 g el cual representa aproximadamente el 10% de pérdida.

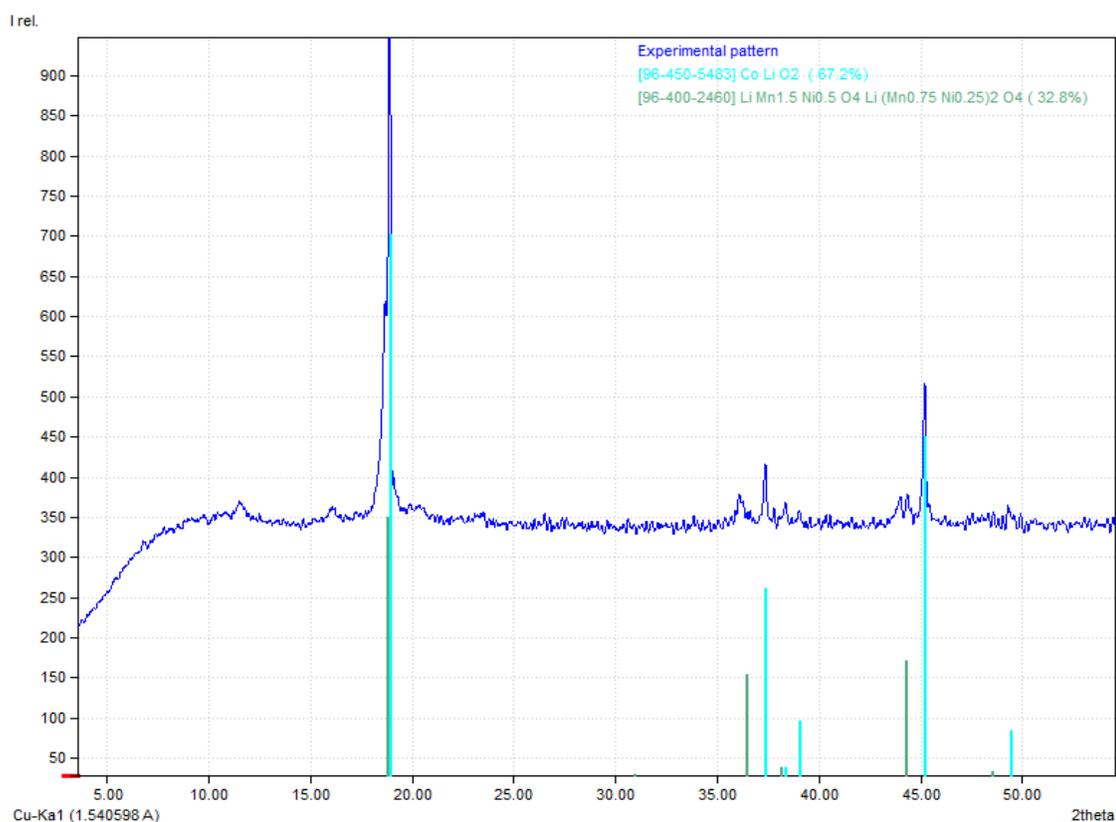
5.2.9. Molido y tamizado

Se obtuvo una masa final de 4115,1 g teniendo una pérdida de 196,7 g el cual representa aproximadamente el 5% de pérdida.

5.2.10. Análisis químico del material catódico

Los resultados muestran que el material catódico contiene **34,55 % p/p de cobalto, 4,7% p/p de litio, 14,70 % p/p de manganeso, 1,45 % p/p de níquel y 0,45 % p/p de cobre**, por lo general también puede llegar a contener carbono y otros elementos. El material catódico fue analizado también por difracción de rayos X (DRX) confirmando la presencia de cobalto en el cátodo. En la figura de abajo se muestra que nuestro elemento de interés esta como óxido de litio cobalto, además del óxido de litio manganeso níquel.

Figura 33 Diagrama de rayos X del material catódico



Fuente: Match! version 2

Se evidencio una composición de 67,2% de óxido de litio cobalto y 32,8% de óxido de litio manganeso níquel.

5.3. Evaluación de los parámetros termodinámicos

Las posibles reacciones del material catódico, principalmente LiCoO_2 , con la solución de ácido sulfúrico como agente lixivante y con la adición de H_2O_2 para el rango de temperaturas de 60, 70 y 80°C (más información Anexo B) son las siguientes:

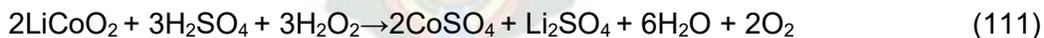


Tabla 33 Valores termodinámicos para la reacción 2

T °C	ΔH kJ	ΔS J/K	ΔG kJ
60	-429,9	934,2	-741,2
70	-423,5	953,3	-750,6
80	-416,9	972,2	-760,3

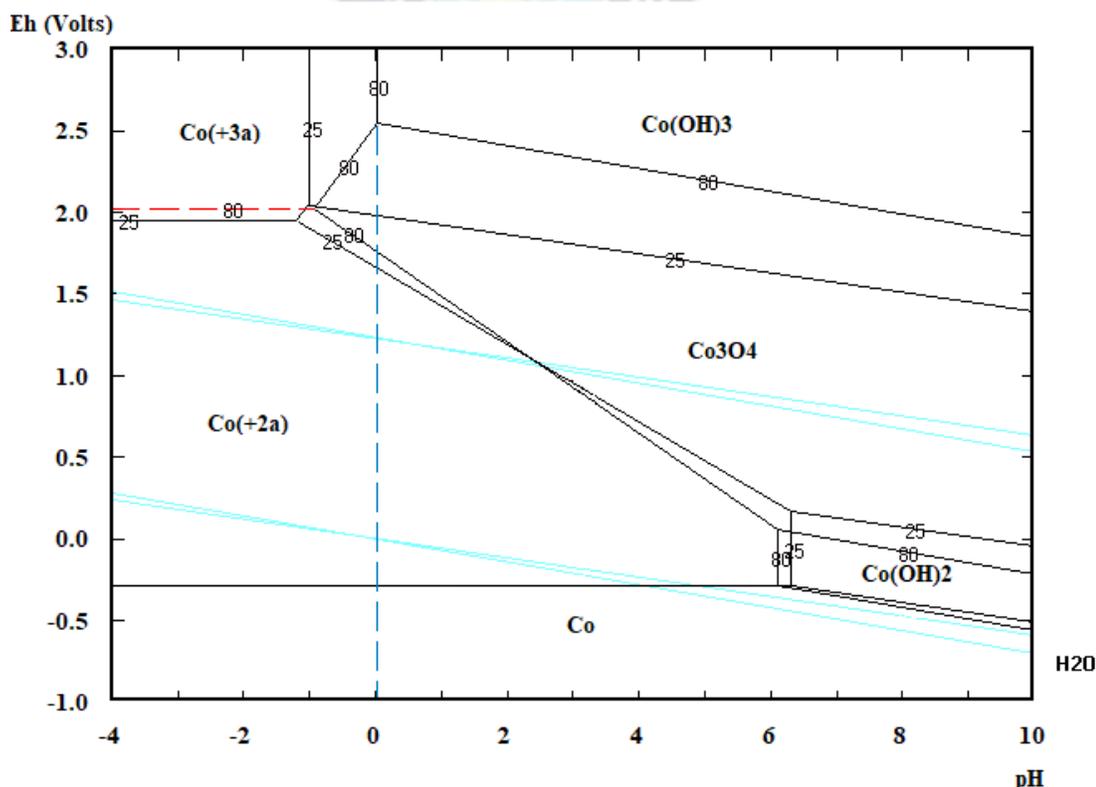
Fuente: HSC Chemistry 6.0

Las reacciones entre el LiCoO_2 y H_2SO_4 , con la adición de H_2O_2 , son posibles ya que todos los valores de variación de energía libre de Gibbs (ΔG) son negativos a las temperaturas dadas principalmente a la temperatura de 70°C , por lo tanto, la solución de ácido sulfúrico puede lixiviar al cobalto presente en el material catódico. Los valores de variación de entalpía (ΔH) también son negativos, lo cual indica que las reacciones son exotérmicas, principalmente a la temperatura de 70°C .

5.3.1. Diagrama Eh – pH

Con el fin de conocer las áreas de estabilidad del cobalto el diagrama Eh-pH para el sistema electroquímico acuoso Co-H₂O, en la figura de abajo se muestra las fases estables durante la lixiviación de cobalto con la solución ácida (H_2SO_4).

Figura 34 Diagrama de equilibrio potencial Eh - pH para el sistema Co - H₂O



Fuente: HSC Chemistryversion 6.0

Como se puede ver en el diagrama Eh-pH que se muestra en la Figura el Co^{+3} es estable en un medio ácido oxidante (potenciales altos y pH muy ácidos), su zona de estabilidad está por encima de la línea de estabilidad del agua por lo que la lixiviación es difícil de lograr en condiciones normales. Es decir, el ion Co^{+3} es poco soluble por lo que es necesario reducirlo a Co^{+2} el cual es más soluble y estable, ya que se encuentra en la zona de estabilidad del agua y puede disolverse en medio ácido, por lo que la reducción ocurrirá a un potencial

redox de 2V, para lo cual se adiciona un agente reductor, en nuestro caso peróxido de hidrógeno (H₂O₂) que no introduce iones extraños al proceso de lixiviación.

El pH de la solución del agente lixivante debe ser muy ácida para disolver el cobalto, ya que la fase soluble del ion Co⁺³ se forma al reducirse a Co⁺² en medios ácidos fuertes.

5.4. Valores óptimos para la lixiviación del cobalto del material catódico

Partiendo de los resultados obtenidos a escala laboratorio se conocieron los valores óptimos de los parámetros de la lixiviación de cobalto del material catódico de las baterías de ion litio recicladas. La tabla de abajo muestra los valores óptimos de los parámetros de lixiviación con los que se obtuvo la mayor cantidad de cobalto lixiviado del material catódico de las baterías de ion litio recicladas.

Tabla 34 Valores óptimos de los parámetros operacionales para la lixiviación de cobalto del material catódico de las baterías de ion litio recicladas

	H ₂ SO ₄
Concentración del agente lixivante	2 M
Concentración del agente reductor H₂O₂	10 % v/v
Temperatura operación	70 °C
Ratio sólido-líquido	100 g/L
Tiempo	3 h
% de Cobalto	86,53%
Agitación	360 rpm

Fuente: (Peñaloza Pimentel, 2022)

5.5. Cinética de lixiviación

Los modelos cinéticos del núcleo que se encoge sin reaccionar, Crank-Ginstling y Brounshtein, y el de conversión progresiva para partículas esféricas de tamaño decreciente fueron analizados para establecer la ecuación cinética, ya que estos modelos describen las reacciones heterogéneas en la que las partículas sólidas se consumen por disolución o reacción dando como resultado un producto. En la tabla 14 se muestran las ecuaciones cinéticas de estos modelos analizados.

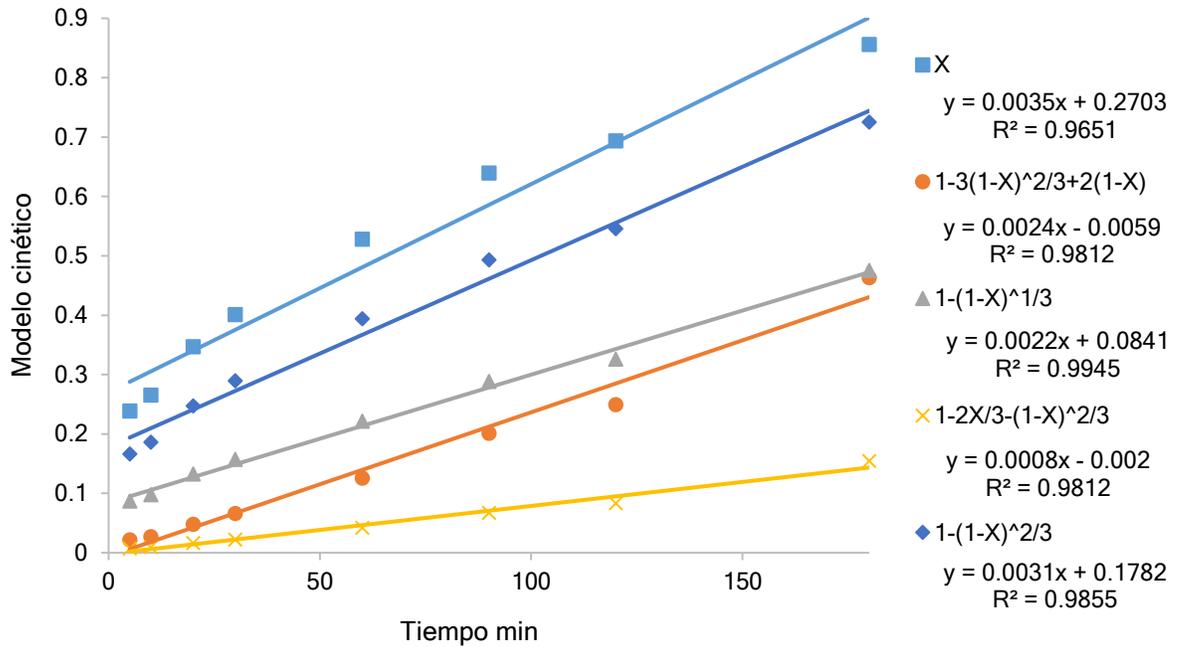
5.5.1. Modelo cinético de la lixiviación del cobalto

Los pares de datos obtenidos, eficiencia de lixiviación de cobalto y tiempo (X_{Co}, t), fueron graficadas usando las ecuaciones cinéticas de los modelos mostrados en la tabla 14.

A partir del ajuste lineal de los modelos cinéticos considerados para la lixiviación de cobalto del material catódico de las baterías de ion litio, se determinó la ecuación cinética de la lixiviación de cobalto en las condiciones establecidas.

Los valores obtenidos eficiencia de lixiviación de cobalto y tiempo (X_{Co}, t) se reemplazan en los modelos cinéticos, como se observa a continuación:

Figura 35 Análisis cinético de la lixiviación de Cobalto del material catódico con ácido sulfúrico



Fuente: (Peñaloza Pimentel, 2022)

Según la figura 35 el modelo del núcleo que se encoge sin reaccionar tiene el coeficiente de regresión lineal más cercano a uno ($R = 0,9972$). Por lo tanto, la lixiviación de cobalto con H_2SO_4 y H_2O_2 en las condiciones establecidas está controlada por la etapa de reacción química. Teniendo la ecuación lineal ajustada de la ecuación cinética:

$$y = 0,0841 + 0,0022x \quad (112)$$

$$tk = 1 - (1 - X_{Co})^{1/3} \quad (113)$$

por la pendiente la constante de velocidad cinética de orden uno para reacciones heterogéneas¹⁶⁵, tiene un valor de:

$$k = 0,0022 \text{ min}^{-1}$$

¹⁶⁵ (Levenspiel, 2004)

5.5.2. Energía de activación

Como la ecuación de Arrhenius relaciona la constante de velocidad con la temperatura, despejando de la ecuación cinética la constante de velocidad cinética y reemplazando en la ecuación de Arrhenius. Primeramente, determinamos la eficiencia de lixiviación para diferentes temperaturas y tiempos, reemplazamos en la ecuación de Arrhenius para un modelo de Núcleo que se encoge sin reaccionar con etapa controlante en la reacción química:

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \ln \left(\frac{t_1}{t_2} \frac{1 - (1 - X_2)^{1/3}}{1 - (1 - X_1)^{1/3}} \right) = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

Donde:

$$R = 1,987 \text{ cal/mol} \cdot K$$

$$X_2 = 0,5667 \text{ a } T_2 = 60^\circ C \text{ y } t_2 = 120 \text{ min}; X_1 = 0,6392 \text{ a } T_1 = 70^\circ C \text{ y } t_1 = 90 \text{ min}$$

Por lo que la eficiencia de lixiviación de cobalto a 60 °C es 0,5667 en un tiempo de 120 min de lixiviación, a 70 °C y 90 min obtuvimos una eficiencia de 0,6392. Reemplazamos estos valores en la ecuación de Arrhenius:

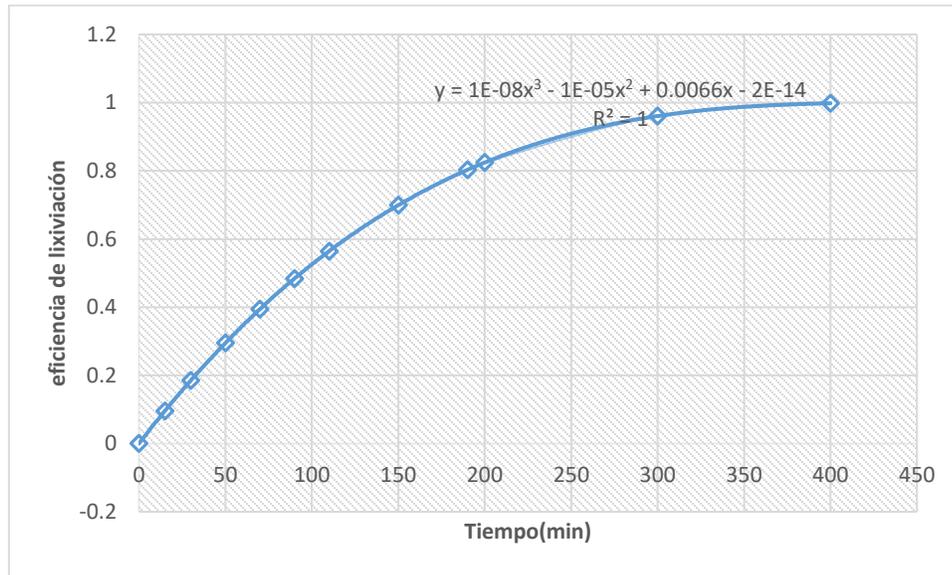
$$\ln \left(\frac{t_1}{t_2} \frac{1 - (1 - X_2)^{1/3}}{1 - (1 - X_1)^{1/3}} \right) = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$
$$\ln \left(\frac{90}{120} \frac{1 - (1 - 0,5667)^{1/3}}{1 - (1 - 0,6392)^{1/3}} \right) = \frac{E_a}{1,987} \left(\frac{1}{343,15} - \frac{1}{333,15} \right)$$
$$E_a = 10,37 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$$

Como la energía de activación es mayor a 10 *kcal/mol*, confirmamos que la reacción química es la etapa controlante en la lixiviación de cobalto con H₂SO₄ y H₂O₂.

5.5.3. Eficiencia de lixiviación en función del tiempo

La siguiente Figura muestra el comportamiento de la eficiencia de lixiviación en función del tiempo en un reactor, donde, se observa como el cobalto lixiviado incrementa a medida que transcurre el tiempo, utilizando la ecuación (25) despejada y calculando la eficiencia de lixiviación en función del tiempo.

Figura 36 Eficiencia de lixiviación en función del tiempo



Fuente: elaboración propia

La tabla de abajo muestra los datos de la Figura 36.

Tabla 35 Eficiencia de la lixiviación en función del tiempo

Tiempo (min)	X_{Co}
0	0
15	0,09576894
30	0,1852195
50	0,295031
70	0,39450426
90	0,48415039
110	0,56448049
150	0,699237
190	0,80286263
200	0,824384
300	0,960696
400	0,998272

Fuente: elaboración propia

5.6. Metodología para el cambio de escala

5.6.1. Volumen del reactor a escala laboratorio

En este caso, el volumen de la solución es de 300 cm^3 . Por lo tanto, se sustituye en la ecuación (26) para determinar el valor del diámetro.

$$D_{RL} = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} 300 \text{ cm}^3}$$

$$D_{RL} = 7 \text{ cm}$$

Cálculo del volumen de seguridad con la ecuación (27):

$$V_{SL} = 0,25 * 300 \text{ cm}^3$$

$$V_{SL} = 75 \text{ cm}^3$$

Entonces el volumen del reactor con la ecuación (28) a escala laboratorio tomando en cuenta el factor de seguridad es:

$$V_{RL} = 300 \text{ cm}^3 + 75 \text{ cm}^3$$

$$V_{RL} = 375 \text{ cm}^3$$

El diámetro del reactor es de 7 cm , con lo cual la altura del reactor tomando en cuenta la altura de seguridad será de la siguiente forma reemplazando en la ecuación (29):

$$L_{RL} = \frac{4 * 375 \text{ cm}^3}{\pi * (7 \text{ cm})^2}$$

$$L_{RL} = 10 \text{ cm}$$

Tabla 36 Dimensiones del reactor a escala laboratorio

V_{RL}	375 cm^3
D_{RL}	7 cm
L_{RL}	10 cm

Fuente: elaboración propia

5.6.2. Diseño del agitador

Con la tabla 15 se logra determinar las dimensiones y la posición del sistema de agitación, conociendo el diámetro del reactor de agitación, el cual es de 7 cm :

- **Diámetro del agitador**

$$D_{aL} = \frac{D_{RL}}{2}$$

$$D_{aL} = \frac{7}{2}$$

$$D_{aL} = 3,5 \text{ cm}$$

El diámetro del agitador debe ser de 3,5 cm.

- **distancia entre la parte inferior del tanque al centro de la turbina**

$$E_L = \frac{D_{RL}}{3}$$

$$E_L = \frac{7}{3}$$

$$E_L = 2,33 \text{ cm}$$

- **Ancho de las paletas del agitador**

$$W_L = \frac{D_a}{5}$$

$$W_L = \frac{3,5 \text{ cm}}{5}$$

$$W_L = 0,7 \text{ cm}$$

El ancho de las paletas del agitador debe ser de 0,7 cm

- **Longitud de las paletas del agitador**

$$L_L = \frac{D_a}{4}$$

$$L_L = \frac{3,5 \text{ cm}}{4}$$

$$L_L = 0,9 \text{ cm}$$

La longitud de las paletas del agitador debe ser de 0,9 cm.

- **Potencia requerida de motor**

Para realizar el cálculo de la potencia requerida del motor para el agitador se deben conocer las características del fluido a ser mezclado, como son principalmente la densidad y viscosidad. Para el cálculo de la potencia requerida se debe determinar primero el número de Reynolds:

Para el cálculo del número de Reynolds se tomó en cuenta la velocidad de agitación, la viscosidad y densidad del fluido (Anexo E.); a la temperatura de operación 70 °C temperatura a la cual se tendrá una viscosidad y densidad determinada.

Usando esos datos se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 37 parámetros para el cálculo del número de Reynolds

D_a	0,035 m
ρ	1189(Kg/m ³)
μ	6,69 * 10 ⁻³ (Pa * s)
N	360 rpm

fuelle: elaboración propia

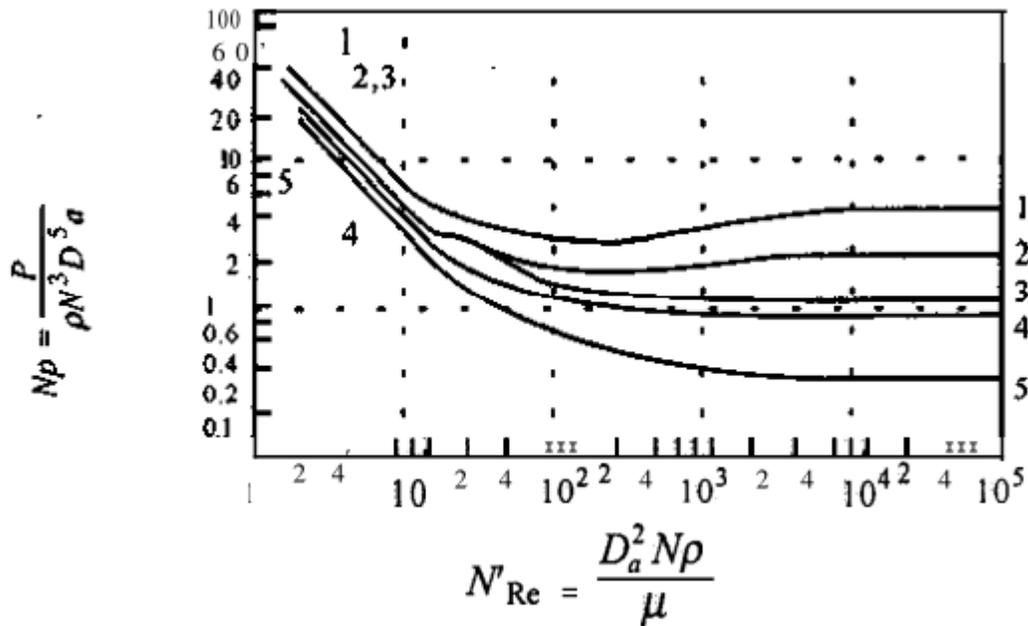
cálculo del número de Reynolds a escala laboratorio mediante la ecuación (30):

$$N_{ReL} = \frac{(0,035 \text{ m})^2 * (360 \text{ rpm}) * 1189(\text{Kg}/\text{m}^3)}{6,69 * 10^{-3}(\text{Pa} * \text{s})} * \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right)$$

$$N_{ReL} = 1306$$

En los resultados se puede observar que el Flujo es laminar. El siguiente paso es determinar el número de potencia (N_p) en función del número de Reynolds (Re), para lo cual se usó la siguiente gráfica:

Figura 37 Número de potencia (N_p) en función de Reynolds (Re) para un sistema de agitación "normal".



Fuente: (Geankoplis, 1998)

Curva 1. Agitador desplazado del centro sin deflectores¹⁶⁶.

¹⁶⁶ (Geankoplis, 1998)

Con la figura 37 se obtiene el número de potencia donde para un número de Reynolds de 1306, obteniéndose un número de potencia de 3,4.

Reemplazando en la ecuación (32) tenemos la potencia requerida a escala laboratorio:

$$P_L = 3,4 * 1189(Kg/m^3) * (6 s^{-1})^3 * (0,035 m)^5$$

$$P_L = 50 W \cong 0.067 hp$$

5.7. Determinación de los números adimensionales utilizando el análisis dimensional

En la siguiente tabla se muestra el listado de las variables significativas implicadas en el análisis, junto con sus respectivas dimensiones. A efecto del presente estudio, las siguientes variables intervienen en el trabajo, para determinar los números adimensionales:

Tabla 38 variables significativas

No	Variable	Símbolo	Dimensiones
1	Diámetro del agitador	D_a	L
2	Velocidad de rotación	N	T^{-1}
3	Densidad	ρ	ML^{-3}
4	Viscosidad dinámica	μ	$ML^{-1}T^{-1}$
5	Potencia	P	ML^2T^{-3}

Fuente: elaboración propia

La tabla de arriba queda bien expresada por la relación funcional:

$$f(D_a, N, \rho, \mu, P) = 0 \quad (114)$$

Es decir, hay cinco variables significativas y tres magnitudes fundamentales (L, M, T), por el Teorema de Buckingham el número de Pi a calcular es:

$$K = n - m \quad (115)$$

Donde:

K = parámetros adimensionales independientes

n = variables significativas $n = 5$

m = magnitudes fundamentales $m = 3$

Por lo tanto, tenemos dos parámetros adimensionales π_1 y π_2 :

$$K = 5 - 3 = 2$$

Tenemos como variables independientes a la viscosidad y el número de potencia. Entonces para el primer parámetro adimensional tenemos:

$$\pi_1 = D_a^a N^b \rho^c \mu \quad (116)$$

Igualar el número " π_1 " adimensional a cero:

$$\pi_1 = D_a^a N^b \rho^c \mu = L^0 M^0 T^0$$

Sustituyendo las dimensiones se llega a:

$$\pi_1 = (L)^a (T^{-1})^b (ML^{-3})^c (ML^{-1}T^{-1})^1 = L^0 M^0 T^0$$

Los exponentes de cada dimensión deben ser los mismos en ambos lados de la ecuación, entonces:

Para L : $a - 3c - 1 = 0$

Para M : $c + 1 = 0$

Para T : $-b - 1 = 0$

Se obtiene un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas y, al resolver, se obtienen los valores de los exponentes:

$$a_1 = -2 \quad b = -1 \quad c = -1$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (50), tenemos que:

$$\pi_1 = \frac{\mu}{D_a^2 N \rho} = \frac{1}{N_{Re}} \quad (117)$$

El análisis dimensional no da información acerca del valor numérico de la constante adimensional, sin embargo, los experimentos o análisis demuestran que el inverso de este número adimensional $1/\pi_1$ es el número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu} \quad (118)$$

Número adimensional = número de REYNOLDS

De forma análoga se obtiene el segundo parámetro adimensional π_2 :

$$\pi_2 = D_a^a N^b \rho^c P \quad (119)$$

$$(L)^a (T^{-1})^b (ML^{-3})^c (ML^2 T^{-3})^1 = L^0 M^0 T^0$$

Para L : $a - 3c + 2 = 0$

Para M : $c + 1 = 0$

Para T : $-b - 3 = 0$

Se obtiene un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas y, al resolver, se obtienen los valores de los exponentes:

$$a_1 = -5 \quad b = -3 \quad c = -1$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (119), tenemos que:

$$\pi_2 = \frac{P}{D_a^5 N^3 \rho} \quad (120)$$

Da lugar al número de potencia:

$$N_p = \frac{P}{D_a^5 N^3 \rho} \quad (121)$$

Numero adimensional = número de potencia

El numero adimensional π_2 es el denominado número de potencia N_p

5.8. Cambio de escala

A continuación, se muestra paso a paso para pasar de una escala laboratorio a una bench.

1. Calcularemos la relación de aumento de escala R , aplicando a todas las dimensiones calculadas a escala laboratorio. Para calcular las nuevas dimensiones utilizando la siguiente ecuación.

$$R = \left(\frac{V_{RB}}{V_{RL}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Si: $V_{RL} = 375 \text{ cm}^3$ y $V_{RB} = 10000 \text{ cm}^3$

Así, la relación de aumento de escala es:

$$R = \left(\frac{10000 \text{ cm}^3}{375 \text{ cm}^3} \right)^{\frac{1}{3}} = 3$$

2. Aplicaremos este valor de R a todas las dimensiones calculadas a escala laboratorio para calcular las nuevas dimensiones:

- **Diámetro del agitador**

$$D_{aB} = R * D_{aL}$$

$$D_{aB} = 3 * 3,5 \text{ cm}$$

$$D_{aB} = 10,5 \text{ cm}$$

- **Distancia entre la parte inferior del tanque al centro de la turbina**

$$E_B = R * E_L$$

$$E_B = 3 * 2,33 \text{ cm}$$

$$E_B = 7 \text{ cm}$$

- **Ancho de las paletas del agitador**

$$W_B = R * W_{aL}$$

$$W_B = 3 * 0,7 \text{ cm}$$

$$W_B = 2,1 \text{ cm}$$

- **Longitud de las paletas del agitador**

$$L_B = R * L_L$$

$$L_B = 3 * 0,9 \text{ cm}$$

$$L_B = 3 \text{ cm}$$

3. Hallamos la velocidad del agitador a escala Bench N_B :

$$N_B = 360 \text{ rpm} * \left(\frac{3,5}{10,5} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$N_B = 173 \text{ rpm}$$

$$N_B = 173 \text{ rpm}$$

4. Para determinar la potencia necesaria se determina primero el número de Reynolds que por semejanza dinámica las fuerzas en puntos homólogos han de ser semejantes, entonces tenemos:

$$Re_L = Re_B$$

$$N_{ReB} = N_{ReL} = 1306$$

El Flujo es laminar ($Re \leq 2000$). El siguiente paso es determinar el número de potencia (N_p) en función del número de Reynolds (Re), para lo cual se usó la gráfica anterior, teniendo el siguiente valor:

$$N_{pB} = 3,4$$

Reemplazando tenemos la potencia requerida a escala Bench:

$$P_{Bench} = 3,4 * 1189 (\text{Kg}/\text{m}^3) * \left(\frac{173 \text{ rpm}}{60 \text{ s}} \right)^3 * (0,105 \text{ m})^5$$

$$P_B = 1236,78 \text{ W} \cong 1,65 \text{ hp}$$

5. Determinación del tiempo de lixiviación con la ecuación de abajo a escala bench:

$$t_B = 180 \text{ min} * \left(\frac{10,5}{3,5} \right)^{\frac{11}{18}}$$

$$t_B = 352 \text{ min} \cong 6 \text{ h}$$

En la tabla de abajo se presentan las dimensiones del reactor de lixiviación a escala laboratorio y a escala bench.

Tabla 39 Resultados del escalado

	Escala laboratorio	Escala bench

Volumen del reactor	$V_{RL} = 375\text{cm}^3$	$V_{RB} = 10000\text{cm}^3$
Diámetro del agitador	$D_{aL} = 3,5\text{ cm}$	$D_{aB} = 10,5\text{ cm}$
Distancia entre la parte inferior del tanque al centro de la turbina	$E_L = 2,33\text{ cm}$	$E_B = 7\text{ cm}$
Ancho de las paletas del agitador	$W_L = 0,7\text{ cm}$	$W_B = 2,1\text{ cm}$
Longitud de las paletas del agitador	$L_L = 0,9\text{ cm}$	$L_B = 3\text{ cm}$
Velocidad de agitación	$N_L = 360\text{ rpm}$	$N_B = 173\text{ rpm}$
Número de Reynolds	$N_{ReL} = 1306$	$N_{ReB} = 1306$
Número de Potencia	$N_{PL} = 3,4$	$N_{PB} = 3,4$
Potencia	$P_L = 50\text{ W}$	$P_B = 1236,78\text{ W}$

Fuente: elaboración propia

Nota: ambos valores de los números de Reynolds (Re), se encuentran en un flujo laminar.

5.8.1. Determinación de las dimensiones del reactor a escala bench

Primeramente, determinamos el diámetro del reactor a escala Bench:

$$D_{RB} = 2 * 10,5\text{ cm}$$

$$D_{RB} = 21\text{ cm}$$

Por lo tanto, la altura de recipiente utilizando la ecuación (29) tomando en cuenta la altura de seguridad para el recipiente es de:

$$L_{RB} = \frac{4 * 10000\text{cm}^3}{\pi * (21\text{cm})^2}$$

$$L_{RB} = 28,9 \cong 29\text{ cm}$$

Tabla 40 Dimensiones del reactor a escala Bench

V_{RB}	10000cm^3
D_{RB}	21 cm
L_{RB}	$28,9\text{cm}$

Fuente: elaboración propia

5.9. Análisis de Transferencia de calor del reactor a escala bench

5.9.1. Calor entregado al reactor

El reactor se encontrará provisto de una chaqueta calefactora, que envolverá al reactor, para calentar el mismo. La temperatura se controlará de manera digital, y se encontrará en el panel de control del reactor, este se encargará de controlar que la chaqueta calefactora se encienda o apague cuando sea necesario con el fin de que la temperatura se mantenga constante.

Para la determinación del coeficiente de conductividad térmica del acero inoxidable 316L se ha utilizado la tabla A-2 de valores para propiedades de metales que se presenta en el (Anexo F). teniendo el siguiente valor:

$$k_{ac\ inox}(70^{\circ}\text{C}) = 16,8 \frac{W}{m^{\circ}\text{C}}$$

Determinamos el radio interno y externo del reactor:

$$r_1 = 10,5 \text{ cm}$$

$$r_2 = 10,5 \text{ cm} + 0,15 \text{ cm}$$

$$r_2 = 10,65 \text{ cm}$$

Cálculo de la resistencia térmica con la ecuación (47):

$$R_t = \frac{\ln(10,65/10,5)}{2\pi * 16,8 \text{ W}/m^{\circ}\text{C} * 0,28 \text{ m}}$$

$$R_{ter} = 4,7992 * 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}/W$$

La temperatura exterior será la temperatura ambiente (aproximadamente $T_2 = 15^{\circ}\text{C}$) y la temperatura interior del reactor $T_1 = 70^{\circ}\text{C}$, hasta la que tendrá que calentar y mantenerse constante durante toda la reacción; entonces la cantidad de calor que se necesita entregar al reactor mediante la ecuación (48):

$$T_1 = 70^{\circ}\text{C}; T_2 = 15^{\circ}\text{C}$$

$$Q_E = \frac{70^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}}{4,7992 * 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}/W}$$

$$Q_E = 114602 \text{ W}$$

5.9.2. Calor generado por la reacción

Se escogió un diámetro de 5 mm para el serpentín y se conoce que la altura del reactor es 29 cm, entonces la cantidad de vueltas posibles del serpentín en el reactor (53) es:

$$N_S = \frac{29 \text{ cm}}{0,5 \text{ cm}} = 58 \text{ vueltas}$$

Sería posible cubrir toda la superficie interna del reactor con un serpentín de 58 vueltas, lo cual en la práctica no es recomendable, y por lo tanto se consideró un espacio entre cada

vuelta del serpentín de la misma medida del serpentín. Por lo tanto, el número de vueltas del serpentín en el interior del reactor es 29. Con el número de vueltas y el diámetro del reactor se calculó la longitud del serpentín mediante la ecuación (54).

$$L_{serpentin} = 29 \text{ vueltas} * \frac{2 * \pi * 21 \text{ cm}}{2} = 19 \text{ m}$$

Determinación del área del serpentín con la ecuación (55):

$$A_{serpentin} = \frac{\pi(0,005)^2}{4}$$

$$A_{serpentin} = 1,96 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

Cálculo del volumen del serpentín que ocupara en el reactor:

$$V_{serpentin} = L_{serpentin} * A_{serpentin}$$

$$V_{serpentin} = 19 \text{ m} * 1,96 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$V_{serpentin} = 373 \text{ cm}^3$$

Por lo tanto, el volumen que ocupa dentro del reactor no afectara el espacio de nuestra solución.

Teniendo en cuenta que el área del serpentín es igual al área de circulación ($A_{serpentin} = A_{Circulación}$) tenemos el flujo volumétrico del agua con la ecuación (56):

$$Q_{H_2O} = 1,96 * 10^{-5} \text{ m}^2 * 0,6 \text{ m/s}$$

$$Q_{H_2O} = 1,18 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Y si se toma la densidad del agua como $1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, se tiene que el flujo másico de agua requerido para mantener la temperatura de operación del reactor a 70°C es:

$$F_{H_2O} = 1,18 * 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3}$$

$$F_{H_2O} = 0,012 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Entonces la masa requerida para un flujo másico de agua de $0,012 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ y un tiempo de lixiviación de 6 h (21600 s) es:

$$m_{H_2O} = 21600 \text{ s} * \frac{0,012 \text{ kg}}{1 \text{ s}} = 255 \text{ kg}$$

Es la masa requerida de agua para retirar el calor generado por la reacción dentro del reactor. Si la temperatura de entrada del agua a 15°C (temperatura ambiente aproximada) se tiene que la temperatura de salida mediante la ecuación (58) es:

$$T_{ss} = 15^\circ\text{C} + \frac{20783 \text{ KJ}}{255 \text{ kg} * 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}}$$

$$T_{ss} = 34^{\circ}\text{C}$$

Por lo tanto, si la temperatura de salida es 34°C se puede estimar la cantidad de calor a ser retirada del reactor por unidad de tiempo.

$$Q_{retirado} = 0,012 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} * ^{\circ}\text{C}} * (34 - 15)^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{retirado} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = 980\text{W}$$

Para la estimación del coeficiente de transferencia de calor U primeramente se calculará el área total de transferencia mediante la ecuación (59) si la longitud del serpentín es 19 m y el diámetro del mismo es $0,005\text{ m}$, entonces el área total de transferencia es:

$$A_{total} = 19\text{ m} * \frac{2 * \pi * 0,005\text{ m}}{2}$$

$$A_{total} = 0,30\text{ m}^2$$

La temperatura media logarítmica se calculó mediante la ecuación(61):

$$LMTD = \frac{(34 - 15)^{\circ}\text{C}}{\ln\left(\frac{70-15}{70-34}\right)}$$

$$LMTD = 40^{\circ}\text{C}$$

Entonces el coeficiente global de transferencia de calor (U) es:

$$U = \frac{980\text{ W}}{0,30\text{ m}^2 * 4^{\circ}\text{C}} = 84 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

En la siguiente tabla se presentan los parámetros de operación y las dimensiones del serpentín de enfriamiento en el interior del reactor de lixiviación.

Tabla 41 Parámetros de operación, dimensiones y material sugerido del serpentín de enfriamiento

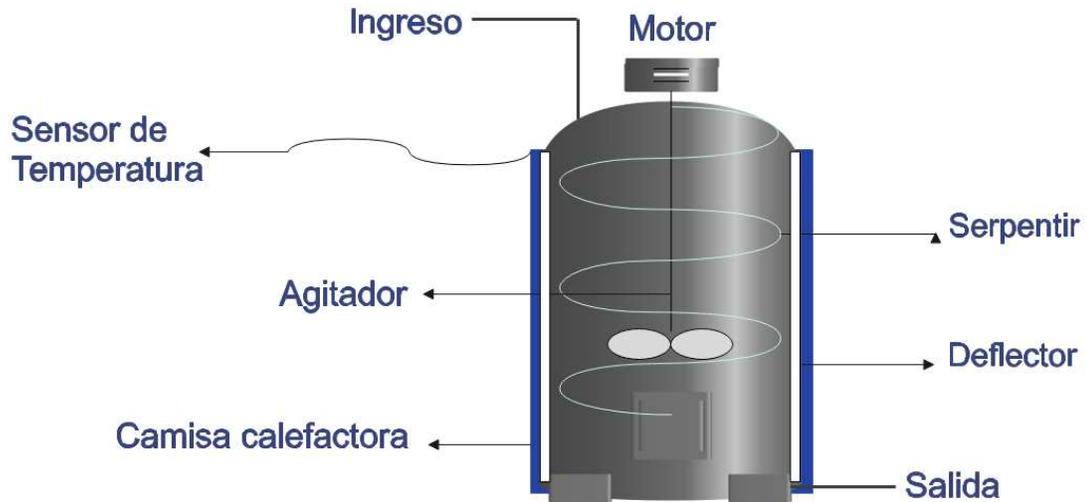
Temperatura de entrada del agua ($^{\circ}\text{C}$)	15
Temperatura de salida del agua ($^{\circ}\text{C}$)	34
Diámetro (m)	0,005
Longitud (m)	19 m
Velocidad de circulación (m/s)	0,6 m/s
Flujo de agua (m^3/s)	$1,18 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
Área total (m^2)	$0,30 \text{ m}^2$
Coeficiente global de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$)	84

Material sugerido	acero inoxidable 316L
--------------------------	-----------------------

Fuente: elaboración propia

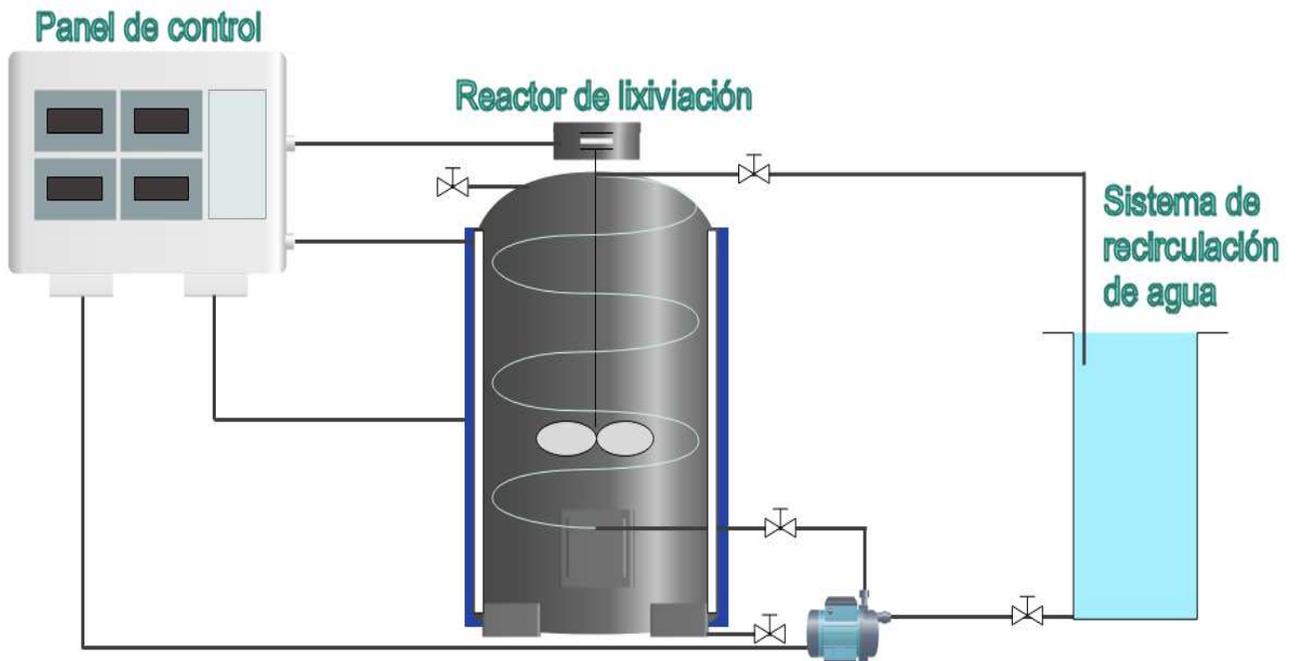
En la figura 38 se presenta el diagrama del reactor de lixiviación propuesta a escala bench para la lixiviación del material catódico de las baterías de ion litio, y en la figura 39 el diagrama del proceso.

Figura 38 Diagrama del reactor de lixiviación



Fuente: Elaboración Propia

Figura 39 Diagrama del proceso



Fuente: Elaboración Propia

5.10. Resultados del proceso de recuperación de cobalto de las baterías de ion litio a Escala Bench

5.10.1. Trituración primaria de las baterías

Primeramente, se determina el valor de cada uno de los flujos másicos, gracias a los datos de la tabla (26) y la ecuación (67):

$$F_{T1carcasa} = 0,2297 * 10 \frac{TON}{año} * \frac{1000Kg}{1TON} * \frac{1año}{330días * 12 \frac{h}{día}} = 0,58 \frac{kg}{h}$$

$$F_{T1separadores y plasticos} = 0,1125 * 10 \frac{TON}{año} * \frac{1000Kg}{1TON} * \frac{1año}{330días * 12 \frac{h}{día}} = 0,28 \frac{kg}{h}$$

$$F_{T1catodo} = 0,3170 * 10 \frac{TON}{año} * \frac{1000Kg}{1TON} * \frac{1año}{330días * 12 \frac{h}{día}} = 0,80 \frac{kg}{h}$$

$$F_{T1aluminio} = 0,0368 * 10 \frac{TON}{año} * \frac{1000Kg}{1TON} * \frac{1año}{330días * 12 \frac{h}{día}} = 0,093 \frac{kg}{h}$$

$$F_{T1grafito} = 0,2544 * 10 \frac{TON}{año} * \frac{1000Kg}{1TON} * \frac{1año}{330días * 12 \frac{h}{día}} = 0,64 \frac{kg}{h}$$

$$F_{T1cobre} = 0,0412 * 10 \frac{TON}{año} * \frac{1000Kg}{1TON} * \frac{1año}{330días * 12 \frac{h}{día}} = 0,104 \frac{kg}{h}$$

$$F_{T1Cvolatiles y SC} = 0,0084 * 10 \frac{TON}{año} * \frac{1000Kg}{1TON} * \frac{1año}{330días * 12 \frac{h}{día}} = 0,021 \frac{kg}{h}$$

Determinamos el volumen del recipiente con la ecuación (68):

$$V_{recipiente} = 0,63 * 0,380 * 0,63 = 0,15m^3$$

Así, se tiene el volumen de nitrógeno que debe ingresar es el siguiente:

$$V_{N_2} = \ln\left(\frac{0,21}{0,05}\right) * = 0,22m^3$$

Teniendo una densidad promedio de $3,79 g/cm^3$ y el flujo de alimentación de $0,8 Ton/h$.

Se puede calcular el tiempo de operación del equipo:

$$t_{operación} = \frac{0,15m^3}{0,8 \frac{TON}{h} * \frac{1}{3,79TON/m^3}} = 0,71 h$$

Por lo tanto, el flujo de nitrógeno es el siguiente:

$$F_{N_2} = \frac{0,22m^3 * 1,2506 Kg/m^3}{0,71h} * \frac{24h}{1dia} * \frac{333dia}{1año} = 1,50 \frac{TON}{año}$$

A continuación, se muestra una tabla resumen de los flujos de entrada y salida que intervienen en esta primera etapa de trituración:

Tabla 42 balance de masa de la etapa de trituración primaria (T_1)

Componentes	Fujo de entrada F_{ET1} (TON/año)	Fujo de nitrógeno F_{N_2} (TON/año)	Fujo de salida F_{ST1} (TON/año)
Carcasa	2,297	0	2,297
Separadores y plásticos	1,125	0	1,125
Cátodo	3,170	0	3,170
Aluminio	0,368	0	0,368
Grafito	2,544	0	2,544
Cobre	0,412	0	0,412
Componentes volátiles y sal conductora	0,084	0	0,084
Nitrógeno	0	1,50	0

Fuente: elaboración propia

Nota: Para el cálculo del tiempo de operación del flujo de N_2 se realizó en base a que la inertización toma el mismo tiempo de operación del equipo. Ya que en caso de que la inertización no haya sido completa, la operación del equipo puede ser peligroso. Por lo que se recomienda que la inertización del equipo comience antes de su puesta en marcha. Así, es posible disminuir el riesgo de que haya oxígeno presente al interior del equipo, y dar una mayor seguridad de que la trituración se lleve a cabo bajo una atmósfera inerte.

5.10.2. Secado

Aplicando las ecuaciones (76) y (77) se obtienen los flujos másicos, correspondientes a los componentes volátiles que abandonan esta etapa como flujo individual y los que quedan como cantidad residual en la corriente principal, Para el balance de masa en esta etapa se estima que la eficiencia de evaporación de componentes orgánicos volátiles (separación del electrolito) es de 70%¹⁶⁷:

¹⁶⁷ (Stehmann, Bradtmöller, & Scholl, 2018)

$$F_{volátiles_{salida}} = F_{SE_{sal}} = 0,70 * 0,084 \frac{TON}{año} = 0,059 \frac{TON}{año}$$

$$F_{volátiles_{residual}} = (1 - 0,70) * 0,084 \frac{TON}{año} = 0,0252 \frac{TON}{año}$$

Primeramente, para calcular el calor requerido, se determinará la temperatura de salida de los componentes orgánicos volátiles. Si la temperatura del aire a la salida es 10 °C superior a la temperatura de ebullición de los compuestos volátiles, de la Tabla 27 se toma la temperatura mayor, entonces la temperatura al abandonar el equipo es:

$$T_{volátiles_{salida}} = 516,70 + 10 = 526,7 K$$

Puesto que se desconoce la proporción exacta de estos compuestos en la mezcla del electrolito, se consideran la temperatura, el calor específico y el calor latente de vaporización promedios:

$$T_{ebullición} = \frac{513,20 + 516,70 + 400,40 + 363,54 + 380,65}{5} = 434,90 K$$

$$C_{p_{electrolito}} = \frac{1,80 + 1,52 + 1,79 + 1,30 + 1,43}{5} = 1,57 \frac{J}{g * K}$$

$$\lambda_{electrolito} = \frac{600,45 + 719,96 + 369,08 + 418,52 + 345,40}{5} = 490,68 \frac{J}{g}$$

Seguidamente, si se conocen los calores específicos y el flujo másico de los componentes de las baterías mediante la Tabla 28, se procede al cálculo del calor requerido en el equipo, mediante la aplicación de la Ecuación (78):

$$q = (0,58 * 0,502 + 0,093 * 0,902 + 0,28 * 1,735 + 0,80 * 0,600 + 0,64 * 0,691 + 0,104 * 0,386) * 1000 * (526,7 - 288,15) + 0,021 * 1000 * 1,57 * (516,70 - 288,15) + 0,7 * 0,021 * 1000 * 490,68 + (0,021 - 0,7 * 0,021) * 1000 * 1,57 * (526,7 - 516,70) + 0,7 * 0,021 * 1000 * 1,57 * (526,7 - 516,7)$$

$$q = 454808,64 \frac{J}{h} = 454808,64 \frac{J}{h} * \frac{1h}{3600s} * \frac{1W}{1 \frac{J}{s}} = 126,34W$$

Sabiendo que el calor transferido en el equipo es de 126,34 W, y que el calor específico del aire es igual a 1,02 J/g * K¹⁶⁸, se puede obtener el flujo de aire necesario para la separación de los componentes volátiles.

La diferencia entre las temperaturas de entrada y salida es de 30 °C superior a la de salida de los compuestos orgánicos volátiles¹⁶⁹. Por lo tanto, despejando la temperatura de entrada del aire de la ecuación (80) tenemos:

¹⁶⁸ (Robert & Don W. Green, 1997)

¹⁶⁹ (Peña Torres, 2019)

$$T_{estrada_{aire}} = \Delta T_{aire} + T_{salida_{aire}} = 30 + 526,70 = 556,7 K$$

Finalmente conociendo el calor transferido, calor específico del aire y la temperatura de entrada y salida del aire, se puede calcular el flujo másico de aire requerido para que esta etapa opere correctamente, utilizando la ecuación (79):

$$m_{aire} = FS_2 = \frac{454808,64 \frac{J}{h} * \frac{330 \text{días} * \frac{12h}{\text{día}}}{1 \text{año}}}{1,02 \frac{J}{g * K} * \frac{10^6 g}{1 TON} * (556,7 - 526,7)} = 58,86 \frac{TON}{\text{año}}$$

A continuación, se expone en la tabla un resumen de los flujos de entrada y salida que intervienen en la etapa de secado:

Tabla 43 Balance de masa de la etapa de secado (SE)

Componentes	Flujo de entrada F_{ET1} (TON/año)	Flujo de componentes retirados $F_{SE_{sal}}$ (TON/año)	Flujo de salida F_{SE} (TON/año)
Carcasa	2,297	0	2,297
Separadores y plásticos	1,125	0	1,125
Cátodo	3,170	0	3,170
Aluminio	0,368	0	0,368
Grafito	2,544	0	2,544
Cobre	0,412	0	0,412
Componentes volátiles y sal conductora	0,084	0,059	0,025

Fuente: elaboración propia

Nota: En caso de que la eficiencia de evaporación de los componentes orgánicos volátiles no sea igual a la obtenida por bibliografía, se verá afectada por dicha diferencia la eficiencia de recuperación del metal y la seguridad de quienes trabajan en el proceso. Para evitar riesgos, con el fin de disminuir las pérdidas de calor al ambiente se sugiere considerar dentro del balance de energía el calor liberado al ambiente como también la factibilidad de instalar un material aislante alrededor del equipo.

Respecto al flujo de salida de los componentes orgánicos volátiles se recomienda la posterior condensación para su recuperación, y así valorizarlos económicamente.

Una recomendación es tratar el electrolito con CO_2 supercrítico (condiciones intermedias entre líquido y gas) para extraer el electrolito. Luego el CO_2 puede ser separado del electrolito después de que la temperatura y la presión son reducidos. Con esto el electrolito extraído se puede reutilizar fácilmente en la fabricación de baterías de ion litio¹⁷⁰.

5.10.3. Trituración secundaria

En la etapa de trituración secundaria no hay ningún tipo de transformación de los componentes, es decir el flujo de alimentación es igual al flujo de salida, por lo que se toman los valores obtenidos del flujo de salida en la etapa de secado para el flujo de alimentación a la etapa de separación magnética.

Tabla 44 Balance de masa de la etapa de trituración secundaria (T2)

Componentes	Flujo de entrada F_{ET2} (TON/año)	Flujo de salida F_{ST2} (TON/año)
Carcasa	2,297	2,297
Separadores y plásticos	1,125	1,125
Cátodo	3,170	3,170
Aluminio	0,368	0,368
Grafito	2,544	2,544
Cobre	0,412	0,412
Sal conductora	0,025	0,025

Fuente: elaboración propia

5.10.4. Separación magnética

Para esta etapa el objetivo es separar la carcasa metálica de los demás componentes, para lo cual se determina el flujo másico de acero para la corriente de salida, como el flujo residual que permanece en la corriente principal. Para ello, teniendo en cuenta una eficiencia de la separación magnética para el acero del 90%¹⁷¹, se aplican las Ecuaciones (82) y (83), tal y como se muestra a continuación:

$$F_{acero\ salida} = 0,900,58 * \frac{Kg}{h} * \frac{1TON}{1000Kg} * \frac{330días * 12 \frac{h}{día}}{1 año} = 2,07 \frac{TON}{año}$$

¹⁷⁰ (Huang, Pan, Su, & An, Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives, 2018)

¹⁷¹ (Svoboda, 1994)

$$F_{acero_{residual}} = (1 - 0,90) * \frac{Kg}{h} * \frac{1TON}{1000Kg} * \frac{330días * 12 \frac{h}{día}}{1 año} = 0,23 \frac{TON}{año}$$

En la tabla de abajo se muestra un resumen de las corrientes que intervienen en esta etapa:

Tabla 45 Balance de masa en la etapa de separación magnética (SM)

Componentes	Flujo de entrada F_{ET2} (TON/año)	Flujo de carcasas retirados F_{SMR} (TON/año)	Flujo de salida F_{SM} (TON/año)
Carcasa	2,297	2,07	0,23
Separadores y plásticos	1,125	0	1,125
Cátodo	3,170	0	3,170
Aluminio	0,368	0	0,368
Grafito	2,544	0	2,544
Cobre	0,412	0	0,412
sal conductora	0,025	0	0,025

Fuente: elaboración propia

Nota: se recomienda realizar una valorización económica de los componentes ferrosos (carcasas). Una posibilidad se encuentra en la venta de dichos materiales a la industria cementera, la cual puede utilizarlos como fuente de hierro para el proceso de elaboración de cemento Portland¹⁷².

5.10.5. Tamizado

Para la presente etapa se pretende separar el cobre y el aluminio, por lo que se procede al cálculo de las cantidades correspondientes a los compuestos que abandonan la etapa, tanto por separado como formando parte de la corriente principal. Conociendo el flujo de cobre y de aluminio en la corriente alimentada, anteriormente calculados y sus eficiencias de separación mediante bibliografía para el cobre del 88%¹⁷³ y el aluminio del 89%¹⁷⁴, se calcula la cantidad de cobre en ambas corrientes aplicando la ecuación (85) y (86):

$$F_{cobre_{salida}} = 0,88 * 0,104 * \frac{Kg}{h} * \frac{1TON}{1000Kg} * \frac{330días * 12 \frac{h}{día}}{1 año} = 0,36 \frac{TON}{año}$$

¹⁷² (SHAMILI, NATARAJAN, & KARTHIKEYAN, 2017)

¹⁷³ (Diekmann, y otros, 2016)

¹⁷⁴ (Diekmann, y otros, 2017)

$$F_{Cobre_{residual}} = (1 - 0,88) * 0,104 \frac{Kg}{h} * \frac{1TON}{1000Kg} * \frac{330días * 12 \frac{h}{día}}{1 \text{ año}} = 0,049 \frac{TON}{año}$$

aplicando las Ecuaciones (87) y (88) para el aluminio:

$$F_{Aluminio_{salida}} = 0,89 * 0,093 \frac{Kg}{h} * \frac{1TON}{1000Kg} * \frac{330días * 12 \frac{h}{día}}{1 \text{ año}} = 0,37 \frac{TON}{año}$$

$$F_{Aluminio_{residual}} = (1 - 0,89) * 0,093 \frac{Kg}{h} * \frac{1TON}{1000Kg} * \frac{330días * 12 \frac{h}{día}}{1 \text{ año}} = 0,0037 \frac{TON}{año}$$

Tabla 46 Balance de masa de la etapa de tamizado (F_{TA})

Componentes	Flujo de entrada F_{ESM} (TON/año)	Flujo de componentes retirados F_{Al+Cu} (TON/año)	Flujo de salida F_{TA} (TON/año)
Carcasa	0,23	0	0,23
Separadores y plásticos	1,125	0	1,125
Cátodo	3,170	0	3,170
Aluminio	0,368	0,37	0,0037
Grafito	2,544	0	2,544
Cobre	0,412	0,36	0,049
Sal conductora	0,025	0	0,025

Fuente: elaboración propia

Nota: Posterior separación del cobre y aluminio, se puede realizar una valorización de ambos metales. Por ejemplo, existen empresas dedicadas al reciclaje de materiales no ferrosos y ferrosos que reutiliza materiales como el aluminio y cobre que son desechados, como es el caso de la Recicladora Cronembold empresa dedicada a Metalurgia y minería e industria ubicada en Santa Cruz¹⁷⁵.

5.10.6. Separación neumática

Primeramente, se calculará el área y el volumen de la partícula:

¹⁷⁵ <http://bolivia.gugadir.com/recicladora-cronembold-direccion/Santa-Cruz/>

$$A_p = \pi * (106 * 10^{-6})^2 = 3,53 * 10^{-8} m^2$$

$$V_p = \frac{\pi * (106 * 10^{-6})^3}{6} = 6,24 * 10^{-13} m^3$$

Una vez determinados estos parámetros, se procede a calcular la velocidad mínima de aire que ingresa al equipo. Aplicando la ecuación (95) y haciendo uso de los valores de la tabla (29).

$$v > \sqrt{\frac{2 * 9,775 * (2230 - 1,23) * 6,24 * 10^{-13} m^3}{0,5 * 1,23 * 3,53 * 10^{-8} m^2}}$$

$$v > 1,12 \frac{m}{s}$$

Por tanto, dado que el valor de la velocidad del aire debe ser estrictamente superior a $1,12 \frac{m}{s}$, se considera una velocidad de $1,13 \frac{m}{s}$. A continuación, se determinará el flujo de aire que debe alimentarse a esta etapa utilizando la ecuación (98) y considerando las dimensiones del equipo expuestas en la tabla 22:

$$F_{aire} = 1,23 \frac{Kg}{m^3} * \frac{333 \text{días} * 12 \frac{h}{\text{día}} * 3600 \frac{s}{h}}{1000 \frac{Kg}{ton}} * 1,13 \frac{m}{s} * (0,25 * 0,41) m^2 = 2030,98 \frac{TON}{año}$$

Una vez determinada el flujo de aire requerido, se procede a calcular los flujos del grafito y plásticos aplicando las ecuaciones (99), (100), (101) y (102), donde la eficiencia de separación del grafito, plásticos y la sal conductora es del 89%¹⁷⁶:

$$F_{grafito_{salida}} = 0,89 * 2,554 \frac{TON}{año} = 2,53 \frac{TON}{año}$$

$$F_{grafito_{residual}} = (1 - 0,89) * 2,554 \frac{TON}{año} = 0,03 \frac{TON}{año}$$

$$F_{sep \text{ y plásticos}_{salida}} = 0,89 * 1,125 \frac{TON}{año} = 1,11 \frac{TON}{año}$$

$$F_{sep \text{ y plásticos}_{residual}} = (1 - 0,89) * 1,125 \frac{TON}{año} = 0,011 \frac{TON}{año}$$

Con el fin de mostrar una visión general de los flujos másicos en esta etapa, en la Tabla de abajo se puede observar un resumen de los mismos:

Tabla 47 Balance de masa de la etapa de separación neumática (F_{SN})

Componentes	Flujo de entrada F_{TA} (TON/año)	Flujo de componentes	Flujo a la salida F_{SN} (TON/año)
-------------	--	----------------------	---

¹⁷⁶ (Eswaraiah, Khavita, Vidyasagar, & Narayanan, 2008)

		retirados <i>F_{SN_R}</i> (TON/año)	
Carcasa	0,23	0	0,23
Separadores y plásticos	1,125	1,11	0,011
Cátodo	3,170	0	3,170
Aluminio	0,0037	0	0,0037
Grafito	2,544	2,53	0,03
Cobre	0,049	0	0,049
Sal conductora	0,025	0,025	0

Fuente: elaboración propia

Nota: Finalmente, respecto al flujo de salida del grafito y los plásticos tienen utilidad como materia prima en la industria cementera, al igual que el flujo de materiales ferrosos¹⁷⁷. Se recomienda, entonces, su valorización económica mediante empresas de ese rubro.

Se asume que el hexafluorofosfato de litio LiPF₆ (sal conductora), que no fue separado en la etapa de separación del electrolito es arrastrado por la corriente de aire de esta etapa, gracias a la volatilidad de dicho compuesto. Por lo que se recomienda emplear carbonato de dimetilo (DMC) como solvente orgánico, el cual se mezclará con el material sólido, para que la sal conductora (LiPF₆) se transfiera a la fase líquida. La extracción de la sal conductora se realizará a 20 °C, velocidad de agitación de 50 rpm, tiempo de extracción para cada etapa de 30 min y la relación de disolvente a masa sólida de 6,2¹⁷⁸.

La sal conductora será extraída con una extracción de flujo cruzado con cuatro etapas¹⁷⁹, la solubilidad del fluoruro de litio (LiF), producto de la descomposición del hexafluorofosfato de litio, en DMC es muy baja en comparación con la solubilidad en agua, que es un disolvente adecuado para la extracción de fluoruro¹⁸⁰. Por lo tanto, se utilizará una segunda serie de extracciones con agua para eliminar el fluoruro con seis etapas. la temperatura de extracción acuosa será fijada a 80 °C, Velocidad de agitación de 50 rpm, tiempo de extracción para cada etapa de 30 min y la relación de disolvente a masa sólida de 10,2 para aumentar la solubilidad del fluoruro y descomponer la sal conductora restante¹⁸¹. Por lo tanto, se necesitan más pruebas para la ampliación a aparatos más grandes para realizar la

¹⁷⁷ (SHAMILI, NATARAJAN, & KARTHIKEYAN, 2017)

¹⁷⁸ (Haas, Pfeifer, Müller, Bradtmöller, & Scholl, 2018)

¹⁷⁹ (Mersmann, Kind, & Stichmair, 2005)

¹⁸⁰ (Jones, Anouti, Caillon-Caravanier, Willmann, & Lemordant, 2009)

¹⁸¹ (Haas, Pfeifer, Müller, Bradtmöller, & Scholl, 2018)

ingeniería de detalle y elegir el tipo de equipo adecuado, ya que no se ha probado exhaustivamente en condiciones experimentales, por lo que se deben realizar más investigaciones sobre estos compuestos presentes en las baterías¹⁸².

5.10.7. Lixiviación

Teniendo el flujo de alimentación del material ($LiCoO_2$), calculamos por estequiometria el flujo de ácido sulfúrico y peróxido de hidrogeno:

$$F_{LiCoO_2} = 3,170 \frac{TON}{año}$$

$$F_{H_2SO_4} = 3,170 \frac{TON}{año} * \frac{3}{2} * \frac{98,079 \text{ g/mol}}{97,87 \text{ g/mol}}$$

$$F_{H_2SO_4} = 4,76 \frac{TON}{año}$$

$$F_{H_2O_2} = 3,170 \frac{TON}{año} * \frac{3}{2} * \frac{34,01 \text{ g/mol}}{97,87 \text{ g/mol}}$$

$$F_{H_2O_2} = 0,55 \frac{TON}{año}$$

Seguidamente, se puede determinar flujos máscicos del ácido sulfúrico y peróxido de hidrogeno consumida en la reacción de lixiviación mediante estequiometria:

$$F_{H_2SO_4} = 3,170 \frac{TON}{año} * \frac{3}{2} * 0,8653 * \frac{98,079 \text{ g/mol}}{97,87 \text{ g/mol}}$$

$$F_{H_2SO_4} = 4,123 \frac{TON}{año}$$

$$F_{H_2O_2} = 3,170 \frac{TON}{año} * \frac{3}{2} * 0,8653 * \frac{34,01 \text{ g/mol}}{97,87 \text{ g/mol}}$$

$$F_{H_2O_2} = 0,48 \frac{TON}{año}$$

En cuanto al agua que ingresa a esta etapa, se determina en base a la ecuación (108) y la concentración de ácido sulfúrico (2 mol/L):

$$F_{H_2O} = \frac{4,76 \text{ TON/año}}{2 \text{ mol/L} * 98,079 \text{ g/mol} * 10^6 \text{ TON/mol}} * 997 \frac{TON}{L} = 24,19 \frac{TON}{año}$$

Determinamos la cantidad de agua a la salida:

$$F_{H_2O_{sal}} = 24,19 \frac{TON}{año} + 3,170 \frac{TON}{año} * \frac{6}{2} * \frac{18 \text{ g/mol}}{97,87 \text{ g/mol}} = 25,94 \frac{TON}{año}$$

Considerando la eficiencia de lixiviación del cobalto contenido en el material catódico calculamos el flujo máscico de cobalto lixiviado:

¹⁸² (Haas, Pfeifer, Müller, Bradtmöller, & Scholl, 2018)

$$F_{CoSO_4} = 3,170 \frac{TON}{año} * \frac{2}{2} * 0,8653 * \frac{155 g/mol}{97,87 g/mol} = 4,34 \frac{TON}{año}$$

Flujo de cobalto residual:

$$F_{CoSO_4 residual} = 3,170 \frac{TON}{año} * \frac{2}{2} * (1 - 0,8653) * \frac{155 g/mol}{97,87 g/mol}$$

$$F_{CoSO_4 residual} = 0,68 \frac{TON}{año}$$

Finalmente, se puede apreciar un resumen de todas las corrientes de la etapa de lixiviado:

Tabla 48 Balance de masa de la etapa de lixiviado

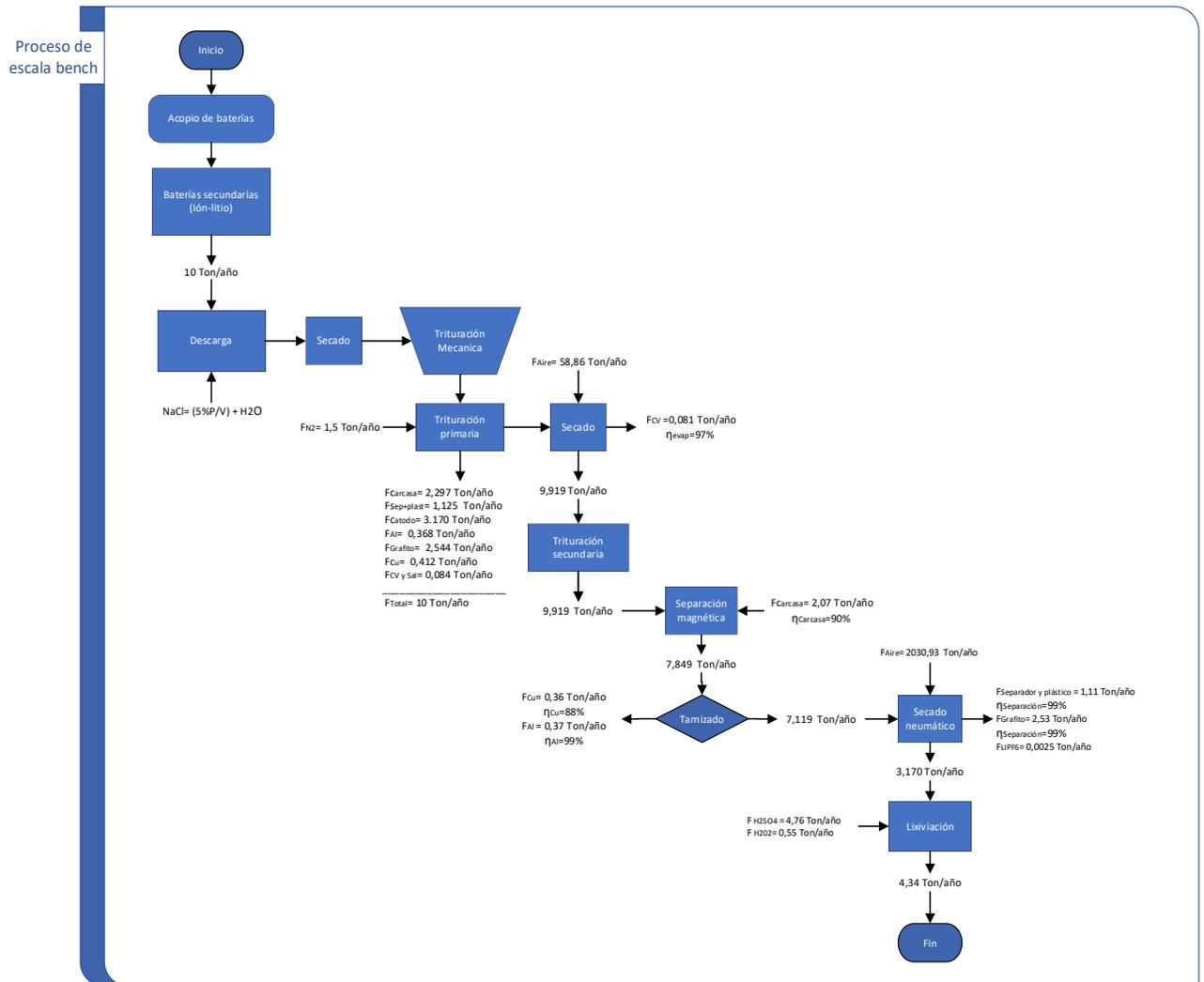
Componentes	Flujo de entrada (TON/año)	Flujo que reacciona (TON/año)	Flujo residual a la salida (TON/año)
Carcasa	0,23	0	0,23
Separadores y plásticos	0,011	0	0,011
Cátodo	3,170	2,74	0,42
Aluminio	0,0037	0	0,0037
Grafito	0,03	0	0,03
Cobre	0,049	0	0,049
Ácido sulfúrico	4,76	4,123	0,64
Peróxido de hidrogeno	0,55	0,48	0,07
Agua	24,19	1,75	25,94
Sulfato de cobalto	0	4,34	0,68

Fuente: elaboración propia

Nota: el cobalto extraído se puede reutilizar fácilmente en la fabricación de nuevos cátodos de las baterías de ion litio. por lo tanto, el reciclaje de baterías promete importantes beneficios económicos¹⁸³.

¹⁸³ (Dubois, Sambeth, & Peluso)

Figura 40 balance de masa de la recuperación de cobalto de las baterías de ion litio a Escala Bench



Fuente: elaboración propia

Nota: se tendrá una producción de 4,34 t/año, por lo que en un día se producirá 0,013 t/día (13 Kg/día aproximadamente), que está dentro el rango de una escala bench donde la cantidad producida va desde 1 kg/día hasta 20 kg/día¹⁸⁴.

¹⁸⁴ (Zlokarnik. , 2006)

Capítulo

VI



6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Se determinó que la generación estimada por habitante año es del 0,037 Kg/hab/año lo que quiere decir que una persona puede llegar a generar en 1 baterías al año. Además, se verificó que el 52% de la población del municipio de La Paz conoce los efectos de las baterías en la salud y el medio ambiente, en tanto el 48% desconoce del tema.
- Para el secado de las baterías se realizó durante tres días aproximadamente, hasta que no quede rastro de la solución salina a temperatura ambiente (de la ciudad de La Paz, 15 °C aproximadamente) sin exposición al sol. Ya que no se cuenta con un horno de secado al vacío el cual hubiera sido más factible.
- Un análisis cuantitativo mediante técnica de espectroscopia de absorción atómica EAA demuestra que los materiales catódicos de las baterías recicladas contienen 34,55 % p/p de cobalto y el análisis por difracción de rayos X (DRX) confirma la presencia de cobalto en el cátodo, donde se evidencio una composición de 67,2% de óxido de litio cobalto.
- Se generó los parámetros termodinámicos, como energía libre de Gibbs, entalpía, temperatura, dando valores de -750,6 KJ, -423,5 KJ y 70°C respectivamente.
- El modelo de cinético del núcleo que se encoge sin reaccionar con etapa controlada por la reacción química. Por lo que la ecuación: $X_{Co} = 1 - (1 - 0,0022 * t)^3$ describe el comportamiento de la eficiencia de lixiviación en función del tiempo en el reactor, donde el cobalto lixiviado incrementa a medida que pasa el tiempo.
- La relación de aumento de escala fue de $R = 3$, dando como resultado las dimensiones del reactor de lixiviación a escala bench a partir de los datos de laboratorio como se muestra en la tabla de abajo.

	Escala laboratorio	Escala bench
Volumen del reactor	$V_{RL} = 375cm^3$	$V_{RB} = 10000 cm^3$
Diámetro del agitador	$D_{aL} = 3,5 cm$	$D_{aB} = 10,5 cm$
Distancia entre la parte inferior del tanque al centro de la turbina	$E_L = 2,33 cm$	$E_B = 7 cm$
Ancho de las paletas del agitador	$W_L = 0,7 cm$	$W_B = 2,1 cm$

Longitud de las paletas del agitador	$L_L = 0,9 \text{ cm}$	$L_B = 3 \text{ cm}$
Velocidad de agitación	$N_L = 360 \text{ rpm}$	$N_B = 173 \text{ rpm}$
Número de Reynolds	$N_{ReL} = 1306$	$N_{ReB} = 1306$
Número de Potencia	$N_{PL} = 3,4$	$N_{PB} = 3,4$
Potencia	$P_L = 50 \text{ W}$	$P_B = 1236,78 \text{ W}$

- Se determinó que el calor entregado al reactor es $Q_E = 114602 \text{ W}$ y el calor retirado es $Q_{retirado} = 980 \text{ W}$ mediante el uso de un serpentín ubicado en el interior del reactor el cual tendrá un diámetro de $0,005 \text{ m}$, $L_{serpentin} = 19 \text{ m}$, $A_{serpentin} = 1,96 * 10^{-5} \text{ m}^2$, flujo másico $F_{H2O} = 0,012 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ y masa de 255 kg , a una temperatura de entrada y salida de $T_{Es} = 15^\circ\text{C}$ y $T_{ss} = 34^\circ\text{C}$ respectivamente.

6.2. Recomendaciones

- La necesidad de educar y concientizar a la población es uno de los principales propósitos a conseguir, debido a ello, para que pueden llevarse a cabo el reciclado de baterías de celular a una mayor escala, es indispensable proyectos de difusión los cuales vayan dirigidos no solamente a empresas, si no a la población en general
- Se recomienda implementar un programa de reciclaje de baterías de ion litio al público en general , ya que la conducta del consumidor es almacenar temporalmente las baterías usadas o disponerlas junto con la basura común, según datos de la encuesta realizada en el presente proyecto, el 50% de la población almacena sus baterías en casa y 20% lo deposita en la basura común generando un riesgo ambiental y en la salud, además que las actuales campañas están enfocadas en recolección y almacenamiento por convenios de instituciones y empresas para tan solo dar una disposición final, tal como se muestra en la figura 9 . La finalidad de esta propuesta publicitaria es dar a conocer los distintos tipos de baterías y de la presencia en algunas de ellas de metales pesados que son considerados tóxicos y ecotóxicos, que aun cuando no son perjudiciales para la salud, por su uso diario podrían ser contaminantes si la batería usada no se dispone apropiadamente al final de su vida útil. El

conocimiento de esta problemática ambiental puede ser un paso decisivo en el éxito del programa, y según la investigación realizada.

- Se recomienda realizar investigaciones sobre métodos para la extracción del electrolito y la sal conductora (LiPF_6) de las baterías de ion litio para eliminar los componentes orgánicos de alto punto de ebullición.
- Debido a la generación de vapores de carácter orgánico durante la apertura de las baterías, se recomienda que dicha apertura cuente con un sistema que colecte dichos vapores para evitar la sobre exposición y que adicionalmente permita un tratamiento adecuado de los mismos, sobre todo si se va escalar el proceso a tamaños industriales donde la cantidad de vapores puede llegar a ser importante y sumamente peligrosa.
- Las salidas intermedias del proceso, como son los plásticos, separadores, carcasa metálica, aluminio, cobre, grafito y componentes volátiles no fueron estudiadas en el presente proyecto por lo que se recomienda realizar un estudio de cada una de ellas.
- Los materiales descartados en esta investigación, pueden llegar a ser revalorizados de manera separada y así ser incorporados nuevamente en los procesos de producción, incluso llegar al punto de impulsar una economía circular, como se muestra a continuación:

El papel que se genera como descarte de este proceso no es apto para los procesos de reciclaje de celulosa, producción de papel de menor calidad como el papel higiénico y servilletas, dado que hay una probabilidad de estar contaminado con sustancias peligrosas por lo que la mejor opción es la producción de biogás o syngas a través de técnicas microbiológicas que conviertan este material a otra forma también aprovechable. El caso de la carcasa metálica, se puede recuperar por métodos tradicionales de gestión de chatarra a través de la fusión del metal para la producción de nuevos elementos. El separador (material polimérico) puede ser recuperado para la producción de biocombustibles, generación syngas u otras alternativas que actualmente se están desarrollando a nivel mundial; a través de técnicas como la biometanización o técnicas termo líticas se pueden encontrar alternativas de revalorización para esta fracción de los residuos.

El ánodo (grafito y cobre), aluminio y el electrolito de los cuales existe poca información ya que rara vez son estudiados¹⁸⁵. Por ejemplo, en una solución de

¹⁸⁵ (Zheng, y otros, 2018)

NaOH 10% p/p, se puede precipitar al Cobre el cual se recupera por filtración¹⁸⁶. Debido a que el electrolito de estas baterías puede llegar a generar gases tóxicos el contenido activo de la batería es rápidamente depositado en un contenedor de plástico que contiene una solución alcalina de NaOH 10% p/p, en una relación 1:10 S/L, es decir, que por cada gramo de material activo se añaden 10 ml de la solución de NaOH y se deja reposar durante 5 horas. Al terminar las 5 horas la solución se filtra.

Como resultado de esta operación la mayoría del Aluminio se disuelve, evitando de esta manera que el catión aluminio entre el proceso de separación. Este Aluminio puede ser recuperado como $\text{Al}(\text{OH})_3$, modificando el pH de la solución dentro de un rango de 4.8 – 5.2¹⁸⁷. Por ejemplo, en una investigación se utilizó carbonato de propileno como solvente para reciclar electrolitos y el polvo de carbono se eliminó por tratamiento térmico¹⁸⁸.



¹⁸⁶ (Hernández Hernández, Elizalde Torres, & Ascanio Gasca, 2014)

¹⁸⁷ (Hernández Hernández, Elizalde Torres, & Ascanio Gasca, 2014)

¹⁸⁸ (Tong, Lai, & Ji, 2005)

7. Bibliografía

Agency for Toxic Substances and Disease Registry/USA. (s.f.).

AIM. Pneumatic Separator | American International Manufacturing Co. - Woodland, CA [en línea]. <http://www.aimfab.com/?page_id=272> . (s.f.).

Alibaba, Peróxido De Hidrógeno,50%. . (2021).

Allendes Arcos , H. M. (2014). DISEÑO Y ESTUDIO DE UN REACTOR A ESCALA BANCO PARA LA BIOOXIDACIÓN DE AZUFRE ELEMENTAL. *MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO E INGENIERO CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA. UNIVERSIDAD DE CHILE;DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA.*

Almendariz Llanos, G. R., & Lara Gavilanes, D. I. (2014). Diseño, Construcción y pruebas de un chiller para el laboratorio de transferencia de calor. *Escuela superior politécnica de chimborazo. Facultad de mecánica Escuela de ingeniería mecánica.*

Alvarenga Ferreira, D., Martins Zimmer Prados, L., Majuste, D., & Borges Mansur, M. (2009). Hydrometallurgical separation of aluminium, cobalt, copper and lithium from spent Li-ion batteries. *Journal of Power Sources 187 (2009) 238–246.*

Álvarez Guerrero, S. (Octubre de 2015). “Recuperación electrolítica de cobalto a partir de sus sales provenientes de desechos de baterías de celular”. *UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS CARRERA DE QUÍMICA. Tesis para optar por el Título Profesional de QUÍMICO.*

AMIGOS DEL PLANETA S.R.L. (29 de 06 de 2020). RAEE. (D. E. Avendaño, Entrevistador)

An, L. (2019). *Methods, Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries.* Cham: Springer International Publishing,.

Antonijević, M., Dimitrijević, M., & Jancovi'c, Z. (1997). Leaching of pyrite with hydrogen peroxide in sulphuric acid. *Hydrometallurgy, 1997. 46(1): p. 71-83.*

- Apablaza, A., Díaz, D., Rodríguez, E., & Vera, S. (s.f.). ESTUDIO CINÉTICO DE LIXIVIACIÓN DE ORO. *ESTUDIO CINÉTICO DE LIXIVIACIÓN DE ORO. Universidad Técnica Federico Santa María Valparaíso, Chile.*
- Aral, H., & Vecchio-Sadus, A. (2008). Toxicity of lithium to humans and the environment--a. *Ecotoxicology and Environmental Safety.*
- Bates, R., Fondy, P., & Corpstein, R. (1963). Examination of some geometric parameters of impeller power. *I&EC PROCESS DESIGN AND DEVELOPMENT*, vol. 2, nº 4, pp. 310-314, 1963. .
- BBC MUNDO. (Marzo de 2017). Obtenido de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-39130179>
- BBVA Research. (2018). *Energía y Materias Primas Litio y Cobalto. Observatorio Económico EEUU.*
- Berger, L. I., Frenkel, M., Koh, C. A., Bradley, P. E., Fuhr, J., Willem, H., & Bruno, T. J. (2014). Handbook of Chemistry and Physics.
- Betancur Pulgarin, J. F. (2016). Recuperación de cobalto y litio de baterías ion-litio por métodos no convencionales.
- Betancur Pulgarín, J. F. (2016). Recuperación de cobalto y litio de baterías ion-litio por métodos no convencionales. Medellín, Colombia.
- bnamericas*. (2019). Obtenido de <https://www.bnamericas.com/es/entrevistas/reciclaje-de-baterias-de-iones-de-litio-su-presente-y-futuro>
- Bulletin, M., Cobalt prices. (2021.).
- Cabrera, S., Benavente, F., Vargas, M., Flores, J. L., Ortega, M., Villca, J. e., . . . Balanza, R. (2012). PERSPECTIVAS EN EL PROCESAMIENTO DE MATERIALES - ELECTRODOS PARA BATERÍAS DE ION LITIO EN BOLIVIA; REVISTA BOLIVIANA DE QUÍMICA;VOLUMEN 29, No.1 – 2012.

CAMBIO-PERIODICO DEL ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA. (20 de 05 de 2018).

Obtenido de BOLIVIA PREVE PRODUCIR BATERIAS DE LITIO PARA EL MUNDO EN 2021: <http://www.cambio.bo/?q=node/45512>

Castillo Uribe, V. (Octubre de 2013). Diseño y calculo de un agitador de fluidos. *Universidad del Bío-Bío; Facultad de Ingenieria; departamento de Ingenieria Mecánica.*

Cesta Torres, I., & Villa Auquilla, W. (2019). Análisis de factibilidad técnica del proceso pirometalurgico para reciclaje de baterías de vehículos con motores eléctricos en Ecuador. *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA. CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ.*

Chang, K., Hallstedt, B., Music, D., Fischer, J., Ziebert, C., Ulrich, S., & Seifert, H. (2013). Thermodynamic description of the layered O3 and O2 structural LiCoO2–CoO2 pseudo-binary systems. *Calphad-computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. Vol. 41, pp. 6-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.calphad.2013.01.001>.*

Chem, L., Ethyl methyl carbonate. (2021).

Cheng, E. J., Taylor, N. J., Wolfenstine, J., & Sakamoto, J. (2017). Elastic properties of lithium cobalt oxide (LiCoO2). *Journal of Asian Ceramic Societies. Volume 5, Issue 2, June 2017, Pages 113-117. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2017.03.001>.*

Conceptos basicos en baterias. (2019). Obtenido de <https://docplayer.es/49316919-Conceptos-basicos-en-baterias.html>.

Contestabile, M., Panero, S., & Scrosati, B. (2001). A laboratory-scale lithium-ion battery recycling process. *Journal of Power Sources 92 (2001) 65-69. DOI: [doi.org/10.1016/S0378-7753\(00\)00523-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00523-1).*

Coronel Aguilar, J. (2014). Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK. *UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK; FACULTAD DE*

*CIENCIAS AMBIENTALES; Como requisito para la obtención del título de:
INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL.*

Correia de Soto, A., & Martín de Armando, M. (2005). Propuesta de un plan de manejo de baterías usadas de teléfonos celulares en Venezuela. *Universidad de Carabobo. Área de Postgrado.*

Crystal Ball Guia de inicio. (s.f.). *Crystal Ball® es marca registrada de Decisioneering, Inc. © 1988-2006, Decisioneering, Inc.*

CUBAEDUCA. (2016). Obtenido de Fundamentos de la Transferencia de masa: <http://educaciones.cubaeduca.cu/medias/pdf/2697.pdf>

DEBER. (2018). Obtenido de https://eldeber.com.bo/economia/una-firma-alemana-sera-la-que-explote-el-litio_41967

Decreto Supremo N° 4711, 1 de mayo de 2022. (s.f.).

Diagnostico de la Gestion de Residuos Solidos en Bolivia. (s.f.). *GESTION DE RESIDUOS SOLIDOS PELIGROSOS Y RESIDUOS SOLIDOS ESPECIALES.*

Diekmann, J., Hanisch, C., Froböse, L., Schällicke, G., Loellhoeffel, T., Fölster, A.-S., & Kwade, A. (2017). Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles with Focus on Mechanical Processes. *Journal of The Electrochemical Society. 164(1): p. A6184-A6191.*

Diekmann, J., Hanisch, C., Frobose, L., Schalicke, G., Loellhoeffel, T., Folster, A.-S., & Kwade, A. (2016). Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles with Focus on Mechanical Processes. *Journal of The Electrochemical Society, 2016. 164(1): p. A6184-A6191.*

Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos, V. d. (2010). *Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia* . La Paz -Bolivia.

E-Chemi, Sulfuric acid price market analysis. (2020).

- EcoInventos* . (2019). Obtenido de <https://ecoinventos.com/solucion-de-reciclaje-de-baterias-de-iones-de-litio/>
- Economipedia (HACIENDO FACIL LA ECONOMIA)*. (Abril de 2018). Obtenido de <https://economipedia.com/actual/el-cobalto-el-nuevo-oro-azul-del-siglo-xxi.html>
- Elwert, T., Goldmann, D., Römer , F., Buchert, M., Merz, C., Schueler, D., & Sutter , J. (2016). Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles. *Recycling 2016*, 1(1), pp.25-60; <https://doi.org/10.3390/recycling1010025>.
- Entegris, Graphite properties and characteristics. (s.f.).
- Entegris, Graphite properties and characteristics. (s.f.).
- envirobat España. (2018). *Reciclado innovador de pilas. Disponible en internet: <http://www.envirobatespaña.com>*.
- Estivariz, L. M. (2019). PROYECTO FUNDACION VIVA. (D. E. Montoya, Entrevistador)
- Estrada Ramírez, N. (2020). Recuperación de cobalto a partir del reciclaje de baterías ion-litio mediante el uso de biolixiviación y electroobtención. *Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Minerales y Materiales Medellín, Colombia. Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería de Materiales y Procesos*.
- Eswaraiah, C., Khavita, T., Vidyasagar, S., & Narayanan, S. (2008). Classification of metals and plastics from printed circuit boards (PCB) using air classifier. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2008. 47(4): p. 565-576.
- Fernández Protomastro, G. (2013). *Minería urbana y la gestión de los recursos electrónicos*. Buenos Aires: Grupo.
- Fogler, H. (2006). *Elements of Chemical Reaction Engineering (Fourth Edition)*. NEAL R. AMUNDSON, SERIES EDITOR, University Of Houston. Copyright O 2006 Pearson Education, Inc.

- Fogler, H. (2008). *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*.
- Forococheselectricos* (FCE). (2018). Obtenido de <https://forococheselectricos.com/2013/05/vida-y-muerte-de-una-bateria-de-ion.html>
- Freitas, M., Celante, V., & Pietre, M. (2010). Electrochemical recovery of cobalt and copper from spent Li-ion batteries as multilayer deposits. *J. Power Sources* 195,3309-3315. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.131.
- Gaines, L., & Burnham, A. (2011). Analysis for Lithium-Ion Battery Production and Recycling Paper No . 11-3891 Life-Cycle.
- Gas, P., Costs of nitrogen gas - How much should you be paying? . (2020).
- Gaur, U., & Wunderlich, B. (1981). Heat capacity and other thermodynamic properties of linear macromolecules. IV. Polypropylene. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1981. 10(4): p. 1051-1064.
- Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias; 3a Edición*. MÉXICO: Compañía editorial continental, S.A. de C.V. MÉXICO.
- Gestión.pe. (19 de 12 de 2017). *Gestión*. Obtenido de Gestión: www.gestion.pe/economia/surgio-locura-cobalto-pasar-2018-223055
- Golmohammadzadeh, R., Rashchi, F., & Vahidi, E. (2017). Recovery of lithium and cobalt from spent lithium-ion batteries using organic acids: Process optimization and kinetic aspects. *Waste Management xxx (2017) xxx–xxx*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/wasman.
- Gómez, A. R., & Ricse Chamorro, J. E. (2013). Recuperación hidrometalúrgica de cobre y molibdeno de las menas de la Unidad Minera de Toromocho. *UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ. FACULTAD DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES*. .

- González Castellanos, R. (Junio de 2018). *Principios Basicos de Escalado*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/325908683_Principios_Basicos_de_Escalado
- Gozzer, S. (2 de Marzo de 2017). *BBC MUNDO*. Obtenido de BBC MUNDO: www.bbc.com/mundo/noticias-39130179
- Grützke, M., Kraft, V., Hoffmann, B., Klamor, S., Diekmann, J., Kwade, A., . . . Nowak, S. (2015). Aging investigations of a lithium-ion battery electrolyte from a field-tested hybrid electric vehicle. *J Power Sources* 273:83–88. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.09.064.
- Grützke, M., Mönnighoff, X., Horsthemke, F., Kraft, V., Winter, M., & Nowak, S. (2015). Extraction of Lithium-Ion Battery Electrolytes with Liquid and Supercritical Carbon Dioxide and Additional Solvents. *RSC Adv* 5(54):43209–43217, DOI: 10.1039/C5RA04451K.
- Guevara Coronado , A. M., & Vargas Pérez, S. (2019). EVALUACIÓN DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE LITIO Y COBALTO PRESENTES EN BATERÍAS GASTADAS DE ION-LI DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS E HÍBRIDOS POR MEDIO DE UN PROCESO DE LIXIVIACIÓN ÁCIDA. *FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA FACULTAD DE INGENIERÍAS PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA BOGOTÁ D.C.. Proyecto integral de grado para optar al título de INGENIERO QUÍMICO*.
- GUEVARA CORONADO, A. M., & VARGAS PÉREZ, S. (2019). EVALUACIÓN DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE LITIO Y COBALTO PRESENTES EN BATERÍAS GASTADAS DE ION-LI DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS E HÍBRIDOS POR MEDIO DE UN PROCESO DE LIXIVIACIÓN ÁCIDA. *Proyecto integral de grado para optar al título de INGENIERO QUÍMICO. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA FACULTAD DE INGENIERÍAS PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA BOGOTÁ D.C.*

- Guevara Coronado, Andrés Mauricio; Vargas Pérez, Stefanny;. (2019). *Evaluación del proceso de recuperación de Litio y Cobalto presente en baterías gastadas de Ión-Li de vehículos eléctricos e híbridos por medio de un proceso de lixiviación Ácida*. BOGOTÁ D.C., BOGOTÁ.
- Haas, P., Pfeifer, S., Müller, J., Bradtmöller, C., & Scholl, S. (2018). Separation of the Electrolyte—Solvent Extraction. *Institute for Chemical and Thermal Process Engineering. TU Braunschweig, Braunschweig, Germany*. © Springer International Publishing AG 2018.
- Harper, G., Sommerville , R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin , R., . . . Anderson , P. (2020). Publisher Correction: Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Feb;578(7794):E20. doi: 10.1038/s41586-019-1862-3*.
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick , E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., . . . Christensen, P. (2020). Publisher Correction: Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles.
- Herguido, J., Santamaría, J., Menéndez, M., & Monzón, A. (1999). *Ingeniería de Reactores*. España: Síntesis.
- Hernández Hernández, O., Elizalde Torres, J., & Ascanio Gasca, G. (2014). Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico/Universidad Nacional Autónoma de México.
- HOJA INFORMATIVA SOBRE SUBSTANCIAS PELIGROSAS. (2005). *SERVICES NEW JERSEY DEPARTMENT of HEALTH and SENIOR*.
- Horeh, N., Mousavi, S., & Shojaosadati, S. (2016). Biorecovery of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus niger*. *Journal of Power Sources, Volume 320, p. 257-266. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.04.104*.
- <https://www.arquimi.com/p2850460-agua-oxigenada-peroxido-de-hidrogeno.html>. (s.f.).
- <https://www.arquimi.com/p2850460-agua-oxigenada-peroxido-de-hidrogeno.html>. (s.f.).

- Huang, B., Pan, Z., Su, X., & An, L. (2018). Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. *ELSEVIER*.
- Huang, B., Pan, Z., Su, X., & An, L. (2018). Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. *J. Power Sources*, vol. 399, pp. 274–286, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.07.116.
- iEPSAS-Agua, Tarifas de agua para 2022 (La Paz). 2022. (s.f.).
- Iglesias, R., Lagos, A., Nogueiras, A., Martínez-Peñalver, C., Marcos, J., Quintans, C., . . . Valdés, M. (2012). Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda .
- Information, N.C.f.B., PubChem Compound Summary for CID 7924, Propylene carbonate. (s.f.).
- Innovación y desarrollo en procesos industriales con ingeniería colombiana. (s.f.). *Ficha tecnica-Vibrasec*.
- INTI. (2016). Gestión de pilas y baterías eléctricas en Argentina. *Gestión de pilas y baterías eléctricas en Argentina / Anónimo. - 1a ed . - San Martín : Instituto Nacional de Tecnología Industrial - NTI, 2016. Libro digital, PDF*.
- Jiadong, Y., Yaqun, H., Zhenzhou, G., Hong, L., Weining, X., & Shuai, W. (2018). A promising physical method for recovery of LiCoO₂ and graphite from. *Separation and Purification Technology*, 45-52.
- Jones, J., Anouti, M., Caillon-Caravanier, M., Willmann, P., & Lemordant, D. (2009). Thermodynamic of LiF dissolution in alkylcarbonates and some of their mixtures with water. *Fluid Phase Equilibria Volume 285, Issues 1–2, 15 November 2009, Pages 62-68*. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2009.07.020>.
- Juárez Mata, R. (s.f.). Modelado de un reactor de lixiviación para el proceso de extracción de metales contenidos en minerales de baja ley. *Tesis Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Procesos*.

- Kaya, M. (2016). Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Management*. Volume 57, November 2016, Pages 64-90. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.08.004.
- Kaya, M. (2016). Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Management*. Volume 57, November 2016, Pages 64-90. DOI:10.1016/j.wasman.2016.08.004.
- Kaya, M. (2016). Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Management*. 57, 64-90. doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.004. *ELSEVIER*.
- kioscoverde. (24 de 06 de 2020). *kioscoverde*. Obtenido de kioscoverde: <https://www.kioscoverde.bo/>
- Korthauer, R. (2013). *Lithium-ion batteries: Basics and Applications*.
- Kumar Jha, M., Kumari, A., Kumari Jha, A., Kumar, V., Hait, J., & Dhar Pandey, B. (2013). Recovery of lithium and cobalt from waste lithium ion batteries of mobile phone. *Waste Management xxx (2013) xxx-xxx*.
- Kwade, A., & Diekmann, J. (2018). *Recycling of Lithium-Ion Batteries*.
- Kwade, A., & Diekmann, J. (2018). *Recycling of Lithium-Ion Batteries, The LithoRec Way*. Cham: Springer International Publishing, 2018. ISBN 978-3-319-70572-9.
- Kwade, Arno; Diekmann, Jan. (2018). *Recycling of Lithium-Ion Batteries, The LithoRec Way*. Cham: Springer International Publishing, 2018. ISBN 978-3-319-70572-9.
- la Razon*. (Agosto de 2018). Obtenido de Bolivia producirá al año hasta 400.000 baterías de litio: http://www.la-razon.com/economia/Bolivia-producira-ano-baterias-litio_0_2976302344.html
- Lain, M. (1998). "CA2313173A1 Recycling of galvanic cells," WO 99/34473.
- Lain, M. J. (Julio de 2001). "Recycling of lithium ion cells and batteries," *J. Power Sources*, vol. 97-98, no. June 2000, pp. 736-738.

- Levenspiel, O. (2004). *INGENIERIA DE LAS REACCIONES QUÍMICAS*. EDITORIAL LIMUSA, S.A. DE C.V. GRUPO NORIEGA EDITORES BALDERAS 95, MEXICO, D.F. C.P. 06040.
- Li, L., Ge, J., Wu, F., Chen, R., Chen, S., & Wu, B. (2010). Recovery of cobalt and lithium from spent lithium ion batteries using organic citric acid as leachant. *Journal of Hazardous Materials* 176 (2010) 288–293. DOI:10.1016/j.jhazmat.2009.11.026.
- LINDE. Inerting in the chemical industry. (s.f.).
- Liu, C., Lin, J., Cao, H., Zhang, Y., & Sun, Z. (2019). Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 2019. 228: p. 801-813. Doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.304.
- LÓPEZ ROSELLO, A. S. (2014). "EFECTO DE LA DENSIDAD DE PULPA Y DE LA CONCENTRACIÓN DE CIANURO DE SODIO EN LA LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN PARA LA RECUPERACION DE ORO EN LA PLANTA DE BENEFICIO DOBLE D – AREQUIPA". *UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA; TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE: PUNO – PERÚ*.
- Maldonado Velásquez, N. (Mayo de 2019). Recuperación "verde" de metales de baterías de ionlitio utilizando cáscara de naranja. *UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ. Colegio de Ciencias e Ingenierías. Ingeniería Ambiental. Trabajo de titulación*. Quito.
- Maleki, H., Hallaj, S. A., Selman, J., Dinwiddie, R., & Wang, H. (1999). Thermal Properties of Lithium-Ion Battery and Components. *Journal of The Electrochemical Society*, 1999. 146(3): p. 947-954.
- Mamani Huanca, B. W. (2018). ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE CONSUMO DE ÁCIDO SULFÚRICO Y LA LIXIVIACIÓN DE MINERALES OXIDADOS DE COBRE

(YACIMIENTO MELTRAL 1, SAMA INCLÁN – TACNA). *UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA; Facultad de Ingeniería; Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales; TESIS Para optar el Título Profesional de: INGENIERO METALURGISTA . TACNA - PERÚ.*

Martínez Bertran, J. (2017). Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas; Trabajo de Final de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales de Barcelona.

Mayorga, J., Chávez, R., Mayorga, O., Delgado-Linares, J., Sánchez, R., & Delgado-Linares, G. (2014). Escalamiento del reactor del proceso de coquización retardada Delayed coking reactor scale – down. *Artículo de Investigación. Revista Ciencia e Ingeniería. Vol. 35, No. 3, pp. 147-156, agosto-noviembre, 2014. ISSN 1316-7081. ISSN Elect. 2244-8780 Universidad de los Andes (ULA), pg 147-156.*

McCabe , W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2007). Operaciones unitarias en ingeniería química.

Mersmann, A., Kind, M., & Stichlmair, J. (2005). Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Methoden, 2., wesentlich erw. und aktualisierte Aufl. Chemische Technik Verfahrenstechnik.

Miao, Y., Hynan, P., Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, 2019. 12(6). *Doi:10.3390/en12061074.*

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Lineamientos Técnicos para el Manejo de Residuos de Aparatos Electricos y Electronicos.*

Mott, R. (2006). Diseño de Elementos de Máquinas. (2da Edición). Ciudad de México, México: Pearson Education.

Muñoz Equihua, E. S. (Junio de 2016). ESCALAMIENTO DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE FRUCTOOLIGOSACÁRIDOS A PARTIR DE JUGO DE CAÑA MEDIANTE

SÍNTESIS ENZIMÁTICA CON CÉLULAS PERMEABILIZADAS DE *Candida apicola*.
TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIA Y
TECNOLOGÍA EN LA ESPECIALIDAD DE PROCESOS AGROINDUSTRIALES.

Muñoz Portero, M. J. (2016). *Extracción de metales por hidrometalurgia: procesamiento de cobre y cinc.*

Murillo García, J. (2016). Análisis de viabilidad de una planta de reciclado de baterías de Litio. *Universidad de Sevilla.*

Northvolt, Business Model Recycling Plant. . (2021).

Nowak, S., & Winter, M. (2015). Review—Chemical Analysis for a Better Understanding of Aging and Degradation Mechanisms of Non-Aqueous Electrolytes for Lithium Ion Batteries: Method Development, Application and Lessons Learned. *J Electrochem Soc* 162(14):A2500–A2508. DOI: 10.1149/2.0121514jes].

Núñez Almanza, J., Gamiño Arroyo, Z., & Rubio Campos, B. (2018). RECUPERACIÓN DE METALES A PARTIR DE BATERÍAS DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS. *Vol. 4 no. 1, Verano de la Investigación Científica, 2018. JOVENES EN LA CIENCIA REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA.*

Ordoñez, J., Gago, E., & Girard, A. (2015). Processes and technologies for the recycling and recovery of spent. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (2016) 195–2015. DOI:doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.363.

Organización Mundial de la Salud. (s.f.).

Otalvaro-Marín, H., & Machuca-Martínez, F. (2020). Sizing of reactors by charts of Damkohler's number for solutions of dimensionless design equations. *journal homepage: www.cell.com/heliyon; Heliyon* 6(2020) e05386;doi:10.1016/j.heliyon.2020.e05386.

- Pagnanelli , F., Moscardini, E., Altimari, P., Abo Atia, T., & Toro, L. (2016). Cobalt products from real waste fractions of end of life lithium ion batteries. *Waste Management, 2016. 51: p. 214-221. Doi:10.1016/j.wasman.2015.11.003.*
- Parga, J., & Carrillo, F. (s.f.). Avances en los métodos de recuperación de oro y plata de minerales refractarios. 254-261.
- Pavez, O. (2016). Apuntes de concentracion de minerales. *Atacama: Universidad de Atacama.*
- Peña Ordóñez, C. (2011). ESTUDIO DE BATERÍAS PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS. Tesis UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID .
- Peña Torres, D. A. (2019). Estudio de factibilidad técnica-económica de un proceso de reciclaje de baterías de ion-litio en la región metropolitana de Chile. *Santiago de Chile.*
- Peñaloza Pimentel, A. (2022). Recuperación de Cobalto a partir de baterías de ión litio recicladas provenientes de teléfonos móviles de la ciudad de La Paz. *Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniería Química. Universidad mayor de San Andrés; Facultad de Ingeniería. La Paz.*
- Pérez Sánchez, A., Pérez Sánchez, E., Heredia Sánchez, A., & Pazos Amayuela, L. (2019). Diseño de in intercambiador de calor de serpentín para el enfriamiento de acetona. Design of helical-coil heat exchanger for acetone cooling. *Nexo revista científica. Vol. 32, No. 01, pp. 61-74/Junio 2019. ISSN-E 1995-9516.*
- Perry. (1997). *Perry's Chemical Engineer's Handbook. Table 2-201 densities of Aqueous Inorganic Solutions On page 2-108.*
- Perry, R. (s.f.). *MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO TOMO II.*
- Pinegar, H., & Smith, Y. (2019). Recycling of End-of-Life Lithium Ion Batteries, Part I: Commercial Processes. *Journal of Sustainable Metallurgy.*
- Portal BNB. (s.f.).

Precio de ácido sulfúrico se cuadruplica y preocupa a las minas de cobre. (2022). Obtenido de Rumbo minero: <https://www.rumbominero.com/peru/precio-acido-sulfurico-cuadruplica-y-preocupa-minas-de-cobre/>

Proyectos RSE-recicla. (s.f.). Obtenido de https://www.soboce.com/rse_proyecto4.asp

Quintero Almanza, D., Gamiño Arroyo, Z., & Martínez Pérez, C. B. (2015). VALORIZACIÓN Y RECUPERACIÓN DE COBALTO A PARTIR DE BATERIAS DE TELEFONOS MOVILES. *REVISTA DE DIVULGACION CIENTIFICA JOVENES EN LA CIENCIA*, 5--10.

Quintero, V., Che, O., Ching², E., Auciello, O., & de Obaldía, E. (2021). Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones. *Revista de I+D Tecnológico. Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá. ISSN: 1680-8894.*

Ranking de los principales países productores de cobalto a nivel mundial en 2021. (2022). Obtenido de statista: <https://es.statista.com/estadisticas/635437/paises-lideres-en-la-produccion-de-cobalto-a-nivel-mundial/>

REEcicla. (2021). *REEcicla.* Obtenido de REEcicla: <http://www.raee-recicla.com/nosotros/>

Residuos profesional. (Marzo de 2018). Obtenido de <https://www.residuosprofesional.com/proyecto-reciclado-baterias-ion-litio/>

Residuos profesional. (marzo de 2018). Obtenido de <https://www.residuosprofesional.com/proyecto-reciclado-baterias-ion-litio/>

Restrepo Baena, O. J. (s.f.). Notas de clase metalurgica extractiva. *Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellin. Colección Facultad de Minas.*

Reunidas, T. (2020). Estudio de tecnologías de reciclado de baterías de ión-litio. Febrero 2020: Madrid.

Reunidas, T. (2021). Informe de Tecnologías de Reciclado de Baterías de Litio.

Robert , H., & Don W. Green, J. (1997). *Perrys Chemical Engineering Handbook: Densities of Miscellaneous Materials.*

- Rolón-Ortiz, H., Acevedo-Peñaloza, C., & Villamizar-González, Y. (2019). Análisis térmico, modelamiento matemático y simulación de un reactor de agitación discontinuo para volumen específico. *Revista UIS Ingenierías; Vol. 18, n.º 1, pp. 39-48, 2019; pagina de la revista: revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias.*
- ROSETO ANDRADE, J. (2015). CÁLCULO Y DISEÑO DE PLANTA PILOTO PARA LA OBTENCIÓN DE FORMIATO DE POTASIO COMO FLUIDO DE PERFORACIÓN. *TRABAJO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO; UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR; FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA; CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA. QUITO.*
- Ruan, J., & Xu, Z. (2016). Constructing environment-friendly return road of metals from e-waste: Combination of physical separation technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Renewable and Sustainable Energy Reviews 54(2016). DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.114.*
- Salas Lara, C. G. (2012). Diseño de un molino de rodillos para molienda de granos, destinado al área de alimentos del cecita-espoch. *Riobamba – Ecuador (2012).*
- Sánchez Echeverri, J. P. (2015). Análisis composicional y determinación de las etapas de conminución para un proceso de recuperación de cobalto a partir de baterías recicladas de Ion-Litio provenientes de celulares. Trabajo de investigación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- Sánchez Echeverri, J. P., Betancur Pulgarín, J. F., & Ocampo Carmona, L. M. (2016). Conminución y análisis granulométrico para un proceso de recuperación de cobalto a partir de baterías de teléfonos móviles. 240-251.
- Sepúlveda, J. E., & Gutierrez R., L. (1986). Dimensionamiento y optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática.
- Sgobba, S. (2010). Physics and measurements of magnetic materials. . *CERN Accelerator School.*

- SHAMILI, S., NATARAJAN, C., & KARTHIKEYAN, J. (2017). An Overview of Electronic Waste as Aggregate in Concrete. *International Journal of Structural and Construction Engineering*. 11(10): 1444–1448.
- Sherman, N. (26 de julio de 2018). *BBC*. Obtenido de NEWS MUNDO: www.bbc.com/mundo/noticias-44966801#share-tools
- Shun, M. S., Kim, N. H., Sohn, J. S., Yang, D. H., & Kim, Y. H. (2005). Development of a metal recovery process from Li-ion battery wastes. *Hydrometallurgy* 79 (2005) 172 – 181. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.06.004>.
- Sigma-Aldrich, Product Specification: Polyethylene. (2021).
- SIGMA-ALDRICH. Product Specification-Ethylene carbonate. (s.f.).
- SIGMA-ALDRICH. Product Specification-LiPF₆. (s.f.).
- Smith, Y. R., Nagel, J. R., & Rajamani, R. K. (2019). Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review. *Minerals Engineering*, 2019. 133: p. 149-159. *Doi:10.1016/j.mineng.2018.12.025*.
- Solís Ulloa, J. (Diciembre de 2017). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR HIBRIDO TIPO BATCH PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES: BIODIÉSEL Y BIOETANOL COMO CASO DE ESTUDIO. *UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN ACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA; COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE*.
- Stanley, M., Englund, F., Laurence, G., & Daniel, A. (s.f.). *Perry's Chemical Handbook: Process Safety*.
- Stehmann, F., Bradtmöller, C., & Scholl, S. (2018). Separation of the Electrolyte—Thermal Drying. p. 139-153.

- Stehmann, F., Bradtmöller, C., & Scholl, S. (2018). Separation of the Electrolyte—Thermal Drying. *Institute for Chemical and Thermal Process Engineering, TU Braunschweig, Braunschweig, Germany*. © Springer International Publishing AG 2018.
- Svoboda, J. (s.f.). The effect of magnetic field strenght on the efficiency of magnetic separation.
- Swiatowska, J., & Barboux, P. (2015). Lithium Battery Technologies: From the Electrodes to the Batteries. En A. Chagnes, & J. Swiatowska, *Lhitium Process Chemistry: Resources, Extraction, Batteries and Recycling* (pág. 41). París: Elsevier Inc.
- Takacova, Z., Havlik, T., Kukurugya, F., & Orac, D. (2016). Cobalt and lithium recovery from active mass of spent Li-ion batteries: Theoretical and experimental approach. *Hydrometallurgy* 163 (2016) 9–17. *journal homepage: www.elsevier.com/locate/hydromet*.
- Tarifa de luz. (2022).
- Technology, N.I.o.S.a., 1,3-Dioxolan-2-one. . (2021).
- Technology, N.I.o.S.a., Carbonic acid, diethyl ester. . (2021).
- Technology, N.I.o.S.a., Carbonic acid, dimethyl ester. . (2021).
- Technology, N.I.o.S.a., Propylene Carbonate. . (2021).
- Tong, D., Lai, Q., & Ji, X. (2005). Recycling of LiCoO₂ cathode materials from spent lithium ion batteries. *College of Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, Sich uan, China*.
- Toolbox, T.E., Gases: Densities. (2021).
- U.S. Environmental Protection Agency. (s.f.).
- Uceda Herrera, D. (2016). *Hidrometalurgia Química e Ingeniería*. 1ª edición, marzo 2016; Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2016-04708.
- Ultrilla Esteban , M. (1995). ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN ENDISTINTOS MEDIOS AGRESIVOS DE LOS ACEROS INOXIDABLES AISI 304L Y

316L PREPARADOS POR VÍA PULVIMETALÚRGICA. *MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR; UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID; FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS; Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Madrid.*

Umicore. (2016). Obtenido de <http://www.umicore.com/en/>

VELEZ SANTA, J. F. (2015). Desarrollo de electrodos y electrolitos para baterias solidas de ion litio en lamina delgada obtenidos por sol-gel. Madrid.

Velez Santa, J. F. (2015). Desarrollo de electrodos y electrolitos para baterias solidas de ion litio en lamina delgada obtenidos por sol-gel. Memoria para optar al grado de Doctor en Ciencias Quimicas. Universidad Autonoma de Madrid. Departamento Quimica Inorganica. España.

Warner, J. T. (2019). Lithium-Ion Battery Chemistries. *Elsevier. ISBN.*

WITTMANN, K. G. (2017). Molinos y trituradores . Australia.

Xu, J., Thomas, H., Francis, R. W., Lum, K. R., Wang, J., & Liang, B. (2008). A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries. *Journal of Power Sources 177 (2008) 512–527. DOI:10.1016/j.jhazmat.2009.11.026.*

Xu, J., Thomas, H., Francis, R. W., Lum, K. R., Wang, J., & Liang, B. (2008). A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries. *Journal of Power Sources 177 (2008) 512–527.*

Xueyi, G., Xiao, C., Guoyong, H., Qinghua, T., & Hongyu, S. (2017). Recovery of lithium from the effluent obtained in the process of spent. *Journal of Environmental Management, 84-89.*

Zeng, G., Deng, X., Luo, S., Luo, X., & Zou, J. (2012). A copper-catalyzed bioleaching process for enhancement of cobalt dissolution from spent lithium-ion batteries. *Journal of Hazardous Materials. Volumes 199–200, 15 January 2012, Pages 164-169. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.063.*

- Zeng, G., Luo, S., Deng, X., Li, L., & Au, C. (2013). Influence of silver ions on bioleaching of cobalt from spent lithium batteries. *Minerals Engineering*. Volume 49, August 2013, Pages 40-44. doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.021.
- Zeng, X., Li, J., & Narendra, S. (2014). Recycling of Spent Lithium-Ion Battery: A Critical Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44:1129–1165. DOI: [10.1080/10643389.2013.763578](https://doi.org/10.1080/10643389.2013.763578).
- Zenteno, B. C. (26 de 06 de 2020). INFORMACIÓN SOBRE RAEE. (D. E. Avendaño, Entrevistador)
- Zhang, T., He, Y., Wang, F., Li, H., Duan, C., & Wu, C. (2014). Separation and Purification Technology. *ELSEVIER*, 138.
- Zheng, X., zhu, z., Lin, X., Zhang, Y., He, Y., Cao, H., & Sun, Z. (2018). A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries. *Engineering*, 4(3), 361-370. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.018>.
- Zhou, X., He, W., Li, G., & Zhang, X. (2010). Recycling of Electrode Materials from Spent Lithium-Ion Batteries. in 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering.
- Zhu, S.-g., He, W.-z., Li, G.-m., Zhou, X., Zhang, X.-j., & Huang, J.-w. (2012). Recovery of Co and Li from spent lithium-ion batteries by combination method of acid leaching and chemical precipitation . *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22(2012) 2274–2281. DOI: [doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61460-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61460-X).
- Zlokarnik, , M. (2006). Scale-up in Chemical Engineering, Wiley-VCH Verlag. Pag (289).

ANEXOS

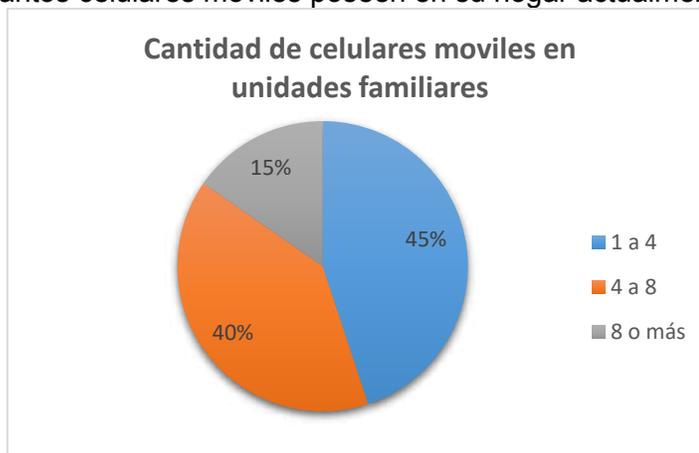
Anexo A.

Resultado encuestas

Encuesta baterías en el municipio de La Paz										
1. ¿Celulares móviles poseen en su hogar actualmente?	1 a 4		4 a 8		8 o más					
	173		153		59					
2. Si existiera una cantidad fuera de uso ¿Cuál es la razón?	Cambio de celular a uno moderno		Celular en mal estado		Hinchazón de la batería de celular (genera inestabilidad en el celular)		otra opción			
	80		121		39		145			
3. ¿Usted cada cuanto renueva o cambia su teléfono móvil (celular)?	cada 6 meses aproximadamente.		cada año		cada 2 años		cada 3 años			
	46		75		143		121			
4. ¿En el caso de cambiar de baterías de celular que hace con la en desuso?	La bota con el resto de la basura		La guarda en su hogar		La lleva algún lugar de acopio de reciclaje		Diferencia la basura para llevarla a un contenedor especial		La deja en algún servidor (técnico de celulares)	
	77		192		33		21		62	
5. ¿Qué marca de teléfono móvil (celular) utiliza comúnmente? (Puede elegir uno o varias opciones).	Samsung	Sony	Sony Ericsson	LG	Huawei	Xiomi	Alcatel	Nokia	Apple	Motorola
	226	27	9	21	123	153	11	18	32	9
6. ¿Dónde compra comúnmente sus celulares?	Comercio formal (importadoras autorizadas, con facturación)		Importación directa (compra online)		Comercio informal (sin facturación)		Segunda mano (conocidos, amigos, otros)			
	197		13		153		22			
7. ¿Usted sabía que es posible dar un tratamiento u disposición final a las baterías de telefonía móvil	Si		No							
	201		184							

(celulares), debido a que llegaría afectar la salud o el medio ambiente, porque son consideradas peligrosas?					
8. ¿Usted estaría de acuerdo en entregar sus baterías de telefonía móvil (celular) en desuso para el reciclado de las mismas?	Si	No			
	366	19			
9. Si en caso de que una empresa recicladora de baterías de celular decida comprar sus baterías en desuso, preferiría que le paguen por unidad o kilo:	Unidad	Kilo			
	324	61			
10. Cuanto estaría dispuesto a pagar por el reciclado de las baterías de celular	Menos de 1 boliviano por batería	1 boliviano por batería	5 bolivianos por kilo	10 bolivianos por kilo	No estoy dispuest@ a pagar
	73	139	68	34	71
11. ¿Conoce alguna institución y/o empresa que recicle baterías de celular?	Si	No			
	36	349			
12. ¿En caso de que una empresa de reciclaje requiera que Ud. pague por reciclar sus baterías usadas de celular, con cual idea se siente más identificado sobre la forma de pago?	No tengo por qué pagar, es deber de la empresa reciclar los residuos que genero	Estoy dispuesto a apagar porque alguien recoja mis residuos, pero lo mínimo posible	Estoy dispuesto a apagar porque alguien recoja mis residuos, pero no estoy seguro de cuanto	Usualmente pago por los servicios de reciclaje de mis residuos, mientras sea una tasa justa	Usualmente pago por los servicios de reciclaje de mis residuos, y si puedo dono residuos
	135	114	83	23	30

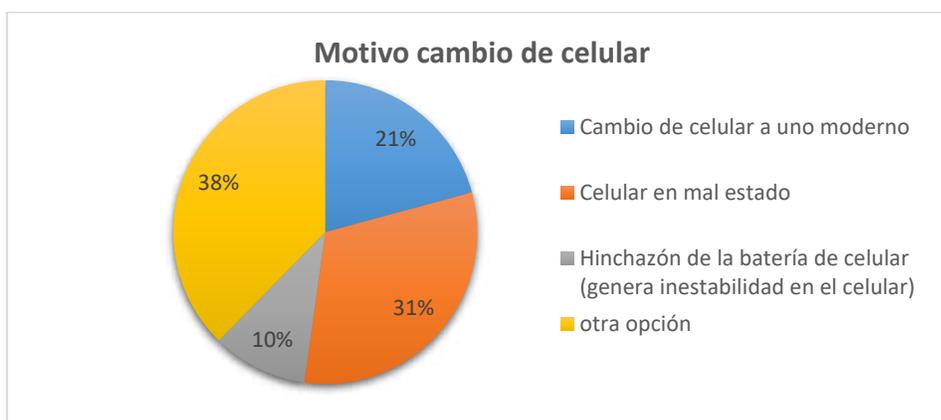
PREGUNTA 1. ¿Cuántos celulares móviles poseen en su hogar actualmente?



¿Celulares móviles poseen en su hogar actualmente?				
Opciones	1 a 4	4 a 8	8 o más	Total
Cantidad	173	153	59	385
Porcentaje	45%	40%	15%	100%

Descripción: De acuerdo a los datos obtenidos respecto a la cantidad de celulares móviles fueron: de 1 a 4 se tiene un 45%, de 4 a 8 un 40%, y de 8 o más un 15%.

PREGUNTA 2. Si existiera una cantidad fuera de uso ¿Cuál es la razón?

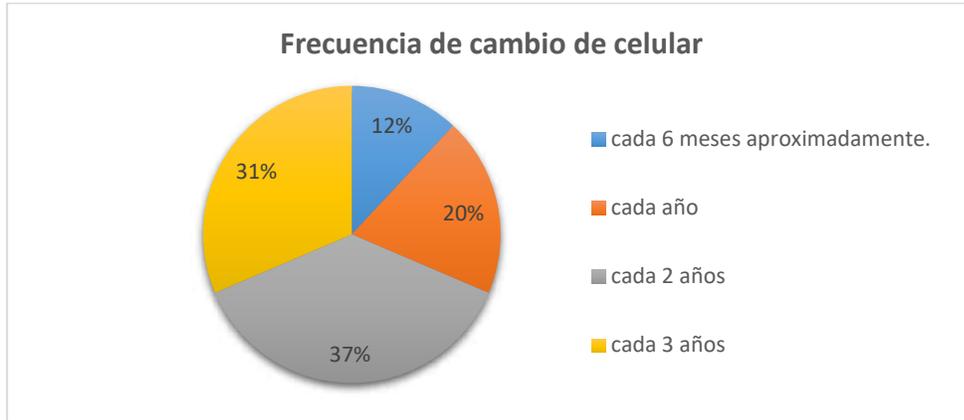


Si existiera una cantidad fuera de uso ¿Cuál es la razón?					
Opciones	Cambio de celular a uno moderno	Celular en mal estado	Hinchazón de la batería de celular (genera inestabilidad en el celular)	otra opción	Total
Cantidad	80	123	39	145	385
Porcentaje	21%	31%	10%	38%	100%

Descripción: Entre otra opción las más frecuentes fueron pérdida o robo, pero en cuanto a la decisión de cambiar el celular notamos que el 31% de la población decide

cambiarlo porque está en mal estado, un 22% lo cambia por uno moderno, y tan solo el 10% lo cambia por hinchazón de la batería.

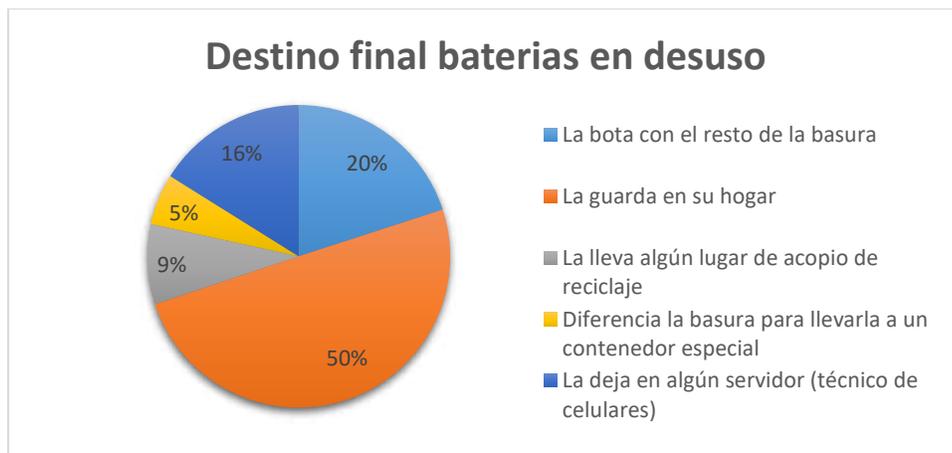
PREGUNTA 3. ¿Usted cada cuanto renueva o cambia su teléfono móvil (celular)?



¿Usted cada cuanto renueva o cambia su teléfono móvil (celular)?					
Opciones	cada 6 meses aproximadamente.	cada año	cada 2 años	cada 3 años	Total
Cantidad	46	75	143	121	385
Porcentaje	12%	20%	37%	31%	100%

Descripción: La renovación o cambio de teléfono móvil se da entre los 2 años con 37%, seguida de cada 3 años con el 31%, cada año el 20% y cada 6 meses aproximadamente el 12%.

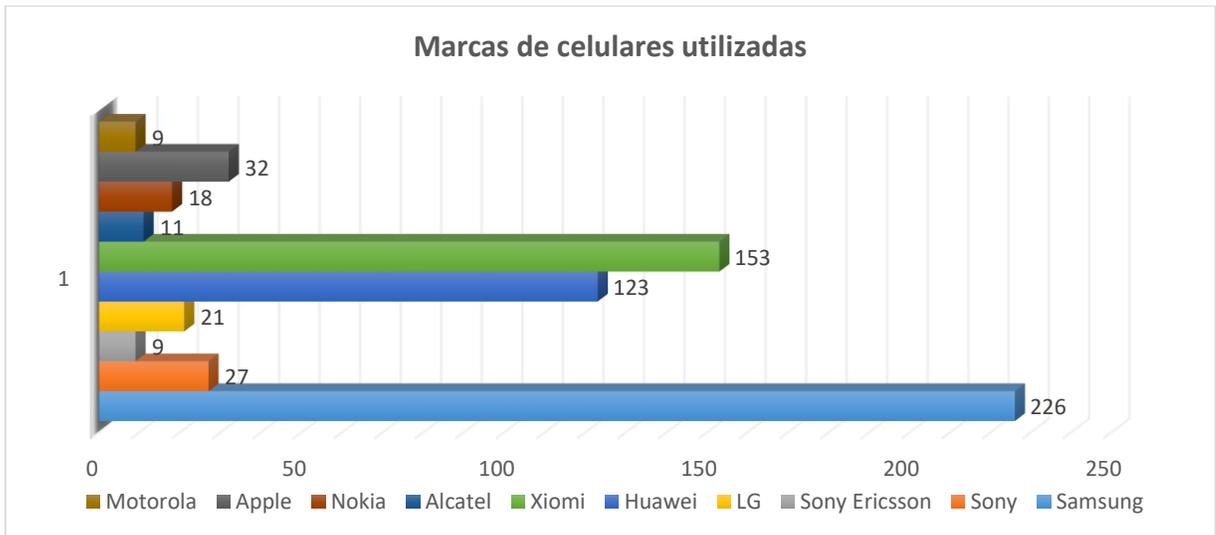
PREGUNTA 4. ¿En el caso de cambiar de baterías de celular que hace con la en desuso?



¿En el caso de cambiar de baterías de celular que hace con la en desuso?						
Opciones	La bota con el resto de la basura	La guarda en su hogar	La lleva algún lugar de acopio de reciclaje	Diferencia la basura para llevarla a un contenedor especial	La deja en algún servidor (técnico de celulares)	Total
Cantidad	77	192	33	21	62	385
Porcentaje	20%	50%	9%	5%	16%	100%

Descripción: El 50% de la población decide guardar su batería de celular en desuso, mientras que un 20% la bota con el resto de la basura, el 16% la deja en algún servidor técnico de celulares, el 9% la lleva algún lugar de acopio, y tan solo el 5% la diferencia de la basura para llevarla a un contenedor especial.

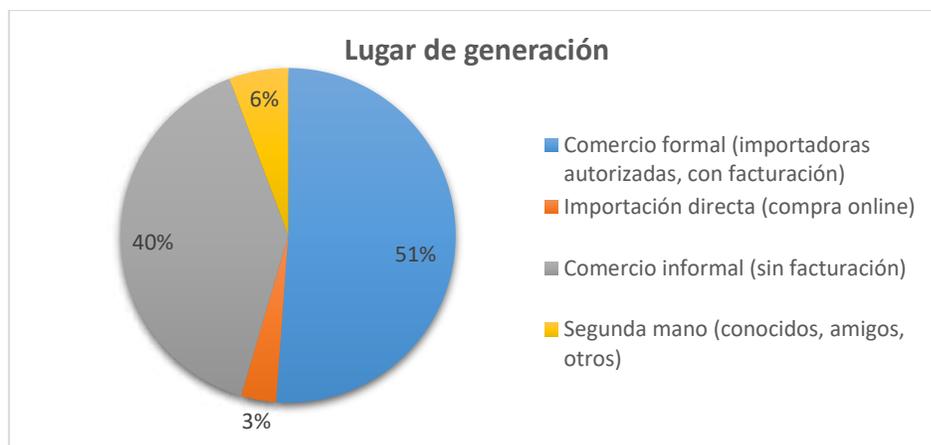
PREGUNTA 5. ¿Qué marca de teléfono móvil (celular) utiliza comúnmente? (Puede elegir uno o varias opciones).



¿Qué marca de teléfono móvil (celular) utiliza comúnmente? (Puede elegir uno o varias opciones).											
Opciones	Samsung	Sony	Sony Ericsson	LG	Huawei	Xiomi	Alcatel	Nokia	Apple	Motorola	Total
Cantidad	226	27	9	21	123	153	11	18	32	9	629
Porcentaje	36%	4%	2%	3%	20%	24%	2%	3%	5%	1%	100%

Descripción: Un 36% de la población tiene un celular de la marca Samsung, el 24% un Xiaomi, 20% un Huawei, el 5% un Apple, 4% un Sony, 3% un Nokia, 2% Alcatel, y un 2% Sony Ericsson y 1% de Motorola.

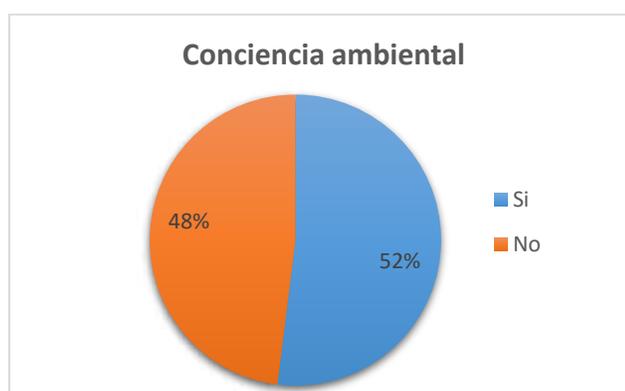
PREGUNTA 6. ¿Dónde compra comúnmente sus celulares?



¿Dónde compra comúnmente sus celulares?					
Opciones	Comercio formal (importadoras autorizadas, con facturación)	Importación directa (compra online)	Comercio informal (sin facturación)	Segunda mano (conocidos, amigos, otros)	Total
Cantidad	197	13	153	22	385
Porcentaje	51%	3%	40%	6%	100%

Descripción: se tiene un 51% en comercio formal (importadoras autorizadas, con facturación), un 3% en importación directa (compra online), un 40% en comercio informal (sin facturación) y un 6% de segunda mano (conocidos, amigos y otros).

PREGUNTA 7. ¿Usted sabía que es posible dar un tratamiento u disposición final a las baterías de telefonía móvil (celulares), debido a que llegaría afectar la salud o el medio ambiente, porque son consideradas peligrosas?

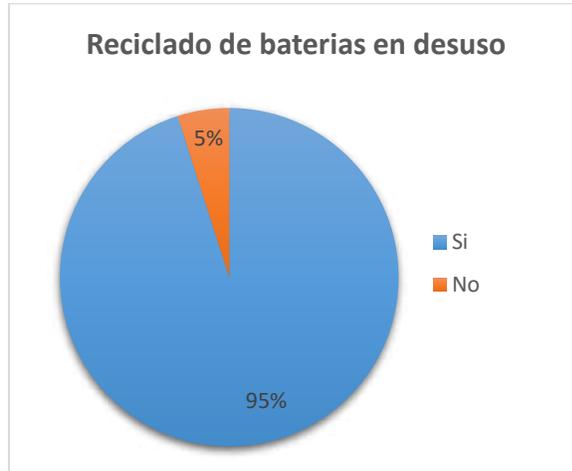


¿Usted sabía que es posible dar un tratamiento u disposición final a las baterías de telefonía móvil (celulares), debido a que llegaría afectar la salud o el medio ambiente, porque son consideradas peligrosas?			
Opciones	Si	No	Total
Cantidad	201	184	385

Porcentaje	52%	48%	100%
-------------------	-----	-----	------

Descripción: El 52% de la población conoce los efectos de las baterías en la salud y en el medio ambiente y 48% desconoce del tema.

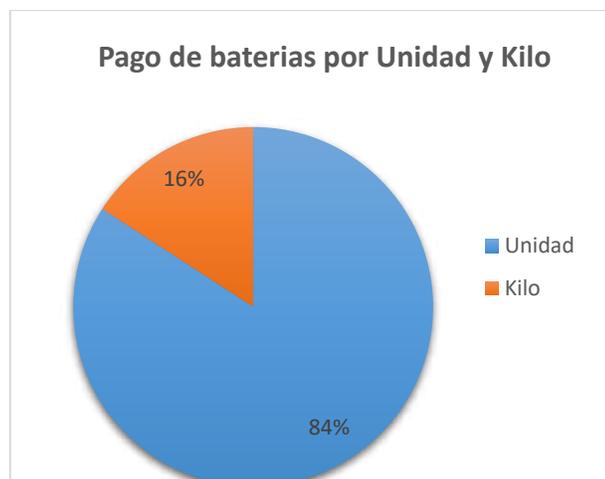
PREGUNTA 8. ¿Usted estaría de acuerdo en entregar sus baterías de telefonía móvil (celular) en desuso para el reciclado de las mismas?



¿Usted estaría de acuerdo en entregar sus baterías de telefonía móvil (celular) en desuso para el reciclado de las mismas?			
Opciones	Si	No	Total
Cantidad	366	19	385
Porcentaje	5%	95%	100%

Descripción: Denotamos que el mayor porcentaje de la población con un 95% está de acuerdo con el reciclado de baterías de celular en desuso y mientras que el 5% no.

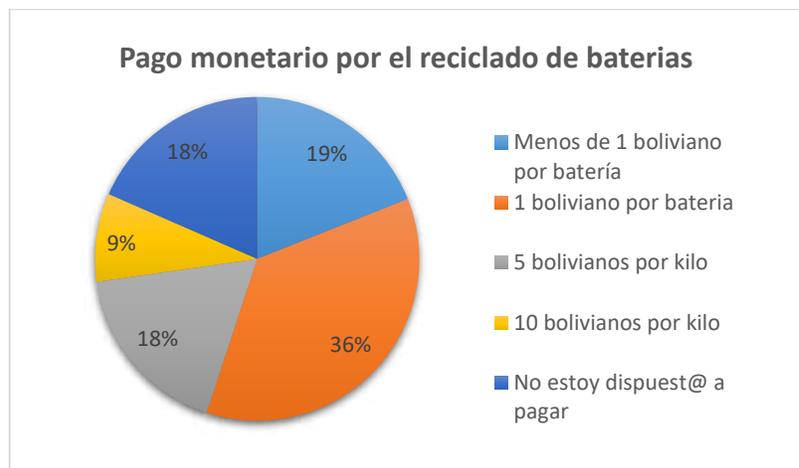
PREGUNTA 9. Si en caso de que una empresa recicladora de baterías de celular decida comprar sus baterías en desuso, preferiría que le paguen por unidad o kilo:



Si en caso de que una empresa recicladora de baterías de celular decida comprar sus baterías en desuso, preferiría que le paguen por unidad o kilo:			
Opciones	Unidad	Kilo	Total
Cantidad	324	61	385
Porcentaje	84%	16%	100%

Descripción: El mayor porcentaje de la población 84% decide pagar por unidad de residuo y tan solo un 16% por kilo.

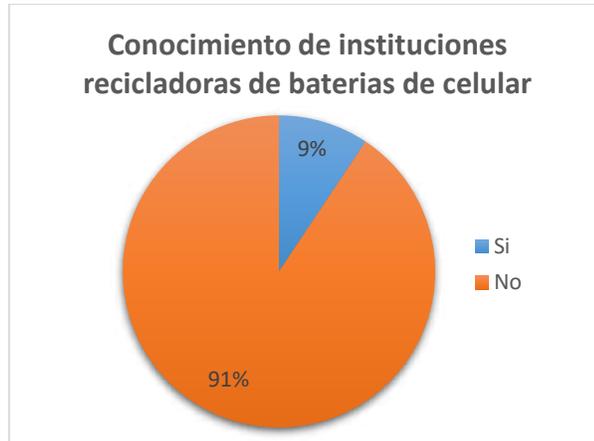
PREGUNTA 10. Cuanto estaría dispuesto a pagar por el reciclado de las baterías de celular



Cuanto estaría dispuesto a pagar por el reciclado de las baterías de celular						
Opciones	Menos de 1 boliviano por batería	1 boliviano por batería	5 bolivianos por kilo	10 bolivianos por kilo	No estoy dispuest@ a pagar	Total
Cantidad	73	139	68	34	71	385
Porcentaje	19%	36%	18%	9%	18%	100%

Descripción: El 36% está dispuesto a pagar un 1 boliviano por batería, 19% menos de 1 boliviano, 18% 5 boliviano por kilo, 9% 10 bolivianos por kilo y el 18% de la población no está dispuesto a pagar

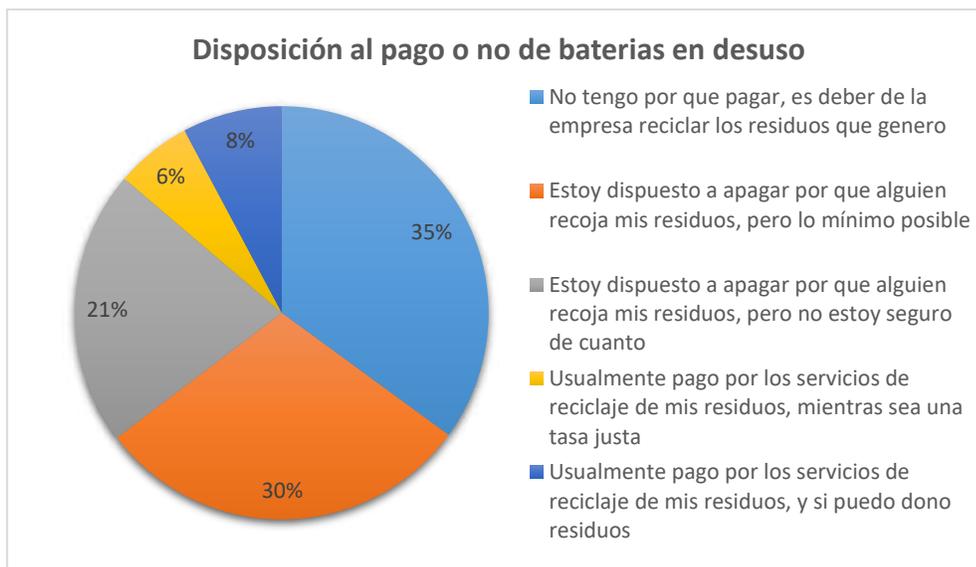
PREGUNTA 11. ¿Conoce alguna institución y/o empresa que recicle baterías de celular?



¿Conoce alguna institución y/o empresa que recicle baterías de celular?			
Opciones	Si	No	Total
Cantidad	36	349	385
Porcentaje	9%	91%	100%

Descripción: El 91% que es la mayoría de la población desconoce de instituciones y/o empresas recicladoras, en cuanto al 9% que si conoce o a oído de alguna.

PREGUNTA 12. ¿En caso de que una empresa de reciclaje requiera que Ud. pague por reciclar sus baterías usadas de celular, con cual idea se siente más identificado sobre la forma de pago?



¿En caso de que una empresa de reciclaje requiera que Ud. pague por reciclar sus baterías usadas de celular, con cual idea se siente más identificado sobre la forma de pago?						
Opciones	No tengo por qué pagar, es deber de la empresa reciclar los residuos que genero	Estoy dispuesto a apagar porque alguien recoja mis residuos, pero lo mínimo posible	Estoy dispuesto a apagar porque alguien recoja mis residuos, pero no estoy seguro de cuanto	Usualmente pago por los servicios de reciclaje de mis residuos, mientras sea una tasa justa	Usualmente pago por los servicios de reciclaje de mis residuos, y si puedo dono residuos	Total
Cantidad	135	114	83	23	30	385
Porcentaje	35%	30%	21%	6%	8%	100%

Descripción: el 35% Se siente más identificado por esta forma de pago: no tiene por qué pagar, puesto que considera que es deber de la empresa reciclar los residuos que género, el 30% Estoy dispuesto a apagar porque alguien recoja mis residuos, pero lo mínimo posible, el 21% Estoy dispuesto a apagar porque alguien recoja mis residuos, pero no estoy seguro de cuanto, el 8% Usualmente pago por los servicios de reciclaje de mis residuos, mientras sea una tasa justa, y el 6% Usualmente pago por los servicios de reciclaje de mis residuos, mientras sea una tasa justa.

Anexo B.

Valores termodinámicos del programa HSC Chemistry 6.0 para las reacciones del material catódico

Ácido sulfúrico



T °C	ΔH kJ	ΔS J/K	ΔG kJ
0,0	-465,7	816,1	-688,7
10,0	-460,1	836,3	-696,9
25,0	-451,4	866,2	-709,7
30,0	-448,5	876,0	-714,0
40,0	-442,4	895,6	-722,9
50,0	-436,3	914,9	-731,9
60,0	-429,9	934,2	-741,2
70,0	-423,5	953,3	-750,6
80,0	-416,9	972,2	-760,3
90,0	-410,2	991,1	-770,1
100,0	-403,3	1009,8	-780,1

Anexo C.

Base de datos del diagrama Eh – pH para el sistema Co - H₂O

Co - Li - H ₂ O - System at 25.00, 60.00, 70.00 and 80.00 °C									
Delta G of H ₂ O kcal/mol	-56.678	-55.327	-54.946	-54.568					
Dielectric Constant	78.381	66.734	63.733	60.867					
Ion Strenght	0	0	0	0					
ELEMENTS	Molality	Pressure							
Co	0.059	0.66							
Li	0.068	0.66							
Species	Delta G/ 25°C kcal/mol	Delta G /60°C kcal/mol	Delta G /70°C kcal/mol	Delta G /80°C kcal/mol					
Co	0.000	0.000	0.000	0.000					
CoO	-51.194	-50.535	-50.349	-50.164					
Co3O4	-189.986	-186.752	-185.827	-184.901					
Co(OH)2	-109.479	-107.125	-106.453	-105.783					
Co(OH)3	-142.526	-138.707	-137.598	-136.480					
Li	0.000	0.000	0.000	0.000					
LiCoO2	-128.457	-124.471	-123.332	-122.192					
LiOH	-104.904	-103.612	-103.242	-102.872					
Co(+3a)	31.937	33.139	33.495	33.855					
Co(+2a)	-13.021	-12.907	-12.871	-12.834					
HCoO2(-a)	-83.426	-79.494	-78.376	-77.259					
Li(+a)	-70.005	-70.433	-70.563	-70.697					
pH									
Eh (Volts)									
X-axis Grid									
Y-axis Grid									
Lines	Area N°	X1 pH	Y1 V	X2 pH	Y2 V	Data set	Slope	X-intersection	Orientation
O2 Formation		-4.00000	-1.00000	10.00000	3.00000				
H2 Formation		-4.00000	1.46543	10.00000	0.63724	1	-0.05916	20.77203	0
O2 Formation		-4.00000	0.23663	10.00000	-0.59157	1	-0.05916	-0.00001	0
H2 Formation		-4.00000	1.49321	10.00000	0.56779	2	-0.06610	18.58975	0
H2 Formation		-4.00000	0.26440	10.00000	-0.66101	2	-0.06610	-0.00001	0
O2 Formation		-4.00000	1.50114	10.00000	0.54795	3	-0.06808	18.04807	0
H2 Formation		-4.00000	0.27234	10.00000	-0.68085	3	-0.06808	0.00001	0
O2 Formation		-4.00000	1.50908	10.00000	0.52811	4	-0.07007	17.53697	0
H2 Formation		-4.00000	0.28028	10.00000	-0.70069	4	-0.07007	0.00000	0
Co	1	6.80895	-0.31874	10.00000	-0.50751	1	-0.05916	1.42092	0
Co	1	-4.00000	-0.31874	6.80895	-0.31874	1	0.00000	0.00000	-1
Co	1	-4.00000	-1.00000	-4.00000	-0.31874	1	0.00000	-4.00000	1
Co	1	10.00000	-0.50751	10.00000	-1.00000	1	0.00000	10.00000	1
Co	1	-4.00000	-1.00000	10.00000	-1.00000	1	0.00000	0.00000	-1
Co	1	6.86416	-0.32054	10.00000	-0.52783	2	-0.06610	2.01487	0
Co	1	-4.00000	-0.32054	6.86416	-0.32054	2	0.00000	0.00000	-1
Co	1	-4.00000	-1.00000	-4.00000	-0.32054	2	0.00000	-4.00000	1
Co	1	10.00000	-0.52783	10.00000	-1.00000	2	0.00000	10.00000	1
Co	1	6.72984	-0.32099	6.86416	-0.32054	3	-0.06809	2.01535	0
Co	1	-4.00000	-0.32099	6.72984	-0.32099	3	0.00000	0.00000	-1
Co	1	-4.00000	-1.00000	-4.00000	-0.32099	3	0.00000	-4.00000	1
Co	1	10.00000	-0.54364	10.00000	-1.00000	3	0.00000	10.00000	1
Co	1	6.60251	-0.32141	10.00000	-0.55947	4	-0.07007	2.01554	0
Co	1	-4.00000	-0.32141	6.60251	-0.32141	4	0.00000	0.00000	-1
Co	1	-4.00000	-1.00000	-4.00000	-0.32141	4	0.00000	-4.00000	1
Co	1	10.00000	-0.55947	10.00000	-1.00000	4	0.00000	10.00000	1
Co3O4	2	-0.67149	2.02556	10.00000	1.39427	1	-0.05916	33.56910	0
Co3O4	2	-0.83239	1.94942	-0.67149	2.02556	1	0.47321	-4.95193	0
Co3O4	2	-0.83239	1.94942	6.80895	0.14128	1	-0.23663	7.40599	0
Co3O4	2	6.80895	0.14128	10.00000	-0.04750	1	-0.05916	9.19712	0
Co3O4	2	10.00000	1.39427	10.00000	-0.04750	1	0.00000	10.00000	1
Co3O4	2	0.01443	2.34144	10.00000	1.68139	2	-0.06610	35.43693	0
Co3O4	2	-0.63770	1.99659	0.01443	2.34144	2	0.52881	-4.41334	0
Co3O4	2	-0.63770	1.99659	6.86416	0.01307	2	-0.26440	6.91361	0
Co3O4	2	6.86416	0.01307	10.00000	-0.19421	2	-0.06610	7.06194	0

Co3O4	2	10.00000	1.68139	10.00000	-0.19421	2	0.00000	10.00000	1
Co3O4	2	0.18583	2.43390	10.00000	1.76570	3	-0.06809	35.93368	0
Co3O4	2	-0.59156	2.01047	0.18583	2.43390	3	0.54468	-4.28264	0
Co3O4	2	-0.59156	2.01047	6.72984	0.01656	3	-0.27234	6.79063	0
Co3O4	2	6.72984	0.01656	10.00000	-0.20609	3	-0.06809	6.97301	0
Co3O4	2	10.00000	1.76570	10.00000	-0.20609	3	0.00000	10.00000	1
Co3O4	2	0.34855	2.52741	10.00000	1.85114	4	-0.07007	36.41872	0
Co3O4	2	-0.54866	2.02447	0.34855	2.52741	4	0.56056	-4.16016	0
Co3O4	2	-0.54866	2.02447	6.60251	0.02017	4	-0.28028	6.67447	0
Co3O4	2	6.60251	0.02017	10.00000	-0.21789	4	-0.07007	6.89035	0
Co3O4	2	10.00000	1.85114	10.00000	-0.21789	4	0.00000	10.00000	1
Co(OH)2	3	6.80895	0.14128	10.00000	-0.04750	1	-0.05916	9.19712	0
Co(OH)2	3	6.80895	0.14128	6.80895	-0.31874	1	0.00000	6.80895	1
Co(OH)2	3	6.80895	-0.31874	10.00000	-0.50751	1	-0.05916	1.42092	0
Co(OH)2	3	10.00000	-0.04750	10.00000	-0.50751	1	0.00000	10.00000	1
Co(OH)3	4	-0.67149	3.00000	-0.67149	2.02556	1	0.00000	-0.67149	1
Co(OH)3	4	-0.67149	2.02556	10.00000	1.39427	1	-0.05916	33.56910	0
Co(OH)3	4	-0.67149	3.00000	0.01443	3.00000	1	0.00000	0.00000	-1
Co(OH)3	4	10.00000	3.00000	10.00000	1.39427	1	0.00000	10.00000	1
Co(OH)3	4	0.01443	3.00000	0.01443	2.34144	2	0.00000	0.01443	1
Co(OH)3	4	0.01443	2.34144	10.00000	1.68139	2	-0.06610	35.43693	0
Co(OH)3	4	0.01443	3.00000	0.18583	3.00000	2	0.00000	0.00000	-1
Co(OH)3	4	10.00000	3.00000	10.00000	1.68139	2	0.00000	10.00000	1
Co(OH)3	4	0.18583	3.00000	0.18583	2.43390	3	0.00000	0.18583	1
Co(OH)3	4	0.18583	2.43390	10.00000	1.76570	3	-0.06809	35.93368	0
Co(OH)3	4	0.18583	3.00000	0.34855	3.00000	3	0.00000	0.00000	-1
Co(OH)3	4	10.00000	3.00000	10.00000	1.76570	3	0.00000	10.00000	1
Co(OH)3	4	0.34855	3.00000	0.34855	2.52741	4	0.00000	0.34855	1
Co(OH)3	4	0.34855	2.52741	10.00000	1.85114	4	-0.07007	36.41871	0
Co(OH)3	4	0.34855	3.00000	10.00000	3.00000	4	0.00000	0.00000	-1
Co(OH)3	4	10.00000	3.00000	10.00000	1.85114	4	0.00000	10.00000	1
Co(+3a)	5	-0.67149	3.00000	-0.67149	2.02556	1	0.00000	-0.67149	1
Co(+3a)	5	-0.83239	1.94942	-0.67149	2.02556	1	0.47321	-4.95193	0
Co(+3a)	5	-4.00000	1.94942	-0.83239	1.94942	1	0.00000	0.00000	-1
Co(+3a)	5	-4.00000	1.94942	-4.00000	3.00000	1	0.00000	-4.00000	1
Co(+3a)	5	-4.00000	3.00000	-0.67149	3.00000	1	0.00000	0.00000	-1
Co(+3a)	5	0.01443	3.00000	0.01443	2.34144	2	0.00000	0.01443	1
Co(+3a)	5	-0.63770	1.99659	0.01443	2.34144	2	0.52881	-4.41334	0
Co(+3a)	5	-4.00000	1.99659	-0.63770	1.99659	2	0.00000	0.00000	-1
Co(+3a)	5	-4.00000	1.99659	-4.00000	3.00000	2	0.00000	-4.00000	1
Co(+3a)	5	-0.67149	3.00000	0.01443	3.00000	2	0.00000	0.00000	-1
Co(+3a)	5	0.18583	3.00000	0.18583	2.43390	3	0.00000	0.18583	1
Co(+3a)	5	-0.59156	2.01047	0.18583	2.43390	3	0.54468	-4.28264	0
Co(+3a)	5	-4.00000	2.01047	-0.59156	2.01047	3	0.00000	0.00000	-1
Co(+3a)	5	-4.00000	2.01047	-4.00000	3.00000	3	0.00000	-4.00000	1
Co(+3a)	5	0.01443	3.00000	0.18583	3.00000	3	0.00000	0.00000	-1
Co(+3a)	5	0.34855	3.00000	0.34855	2.52741	4	0.00000	0.34855	1
Co(+3a)	5	-0.54866	2.02447	0.34855	2.52741	4	0.56056	-4.16017	0
Co(+3a)	5	-4.00000	2.02447	-0.54866	2.02447	4	0.00000	0.00000	-1
Co(+3a)	5	-4.00000	2.02447	-4.00000	3.00000	4	0.00000	-4.00000	1
Co(+3a)	5	0.18583	3.00000	0.34855	3.00000	4	0.00000	0.00000	-1
Co(+2a)	6	-4.00000	1.94942	-0.83239	1.94942	1	0.00000	0.00000	-1
Co(+2a)	6	-0.83239	1.94942	6.80895	0.14128	1	-0.23663	7.40599	0
Co(+2a)	6	6.80895	0.14128	6.80895	-0.31874	1	0.00000	6.80895	1
Co(+2a)	6	-4.00000	-0.31874	6.80895	-0.31874	1	0.00000	0.00000	-1
Co(+2a)	6	-4.00000	-0.31874	-4.00000	1.94942	1	0.00000	-4.00000	1
Co(+2a)	6	-4.00000	1.99659	-0.63770	1.99659	2	0.00000	0.00000	-1
Co(+2a)	6	-0.63770	1.99659	6.86416	0.01307	2	-0.26440	6.91361	0
Co(+2a)	6	6.86416	0.01307	6.86416	-0.32054	2	0.00000	6.86416	1
Co(+2a)	6	-4.00000	-0.32054	6.86416	-0.32054	2	0.00000	0.00000	-1
Co(+2a)	6	-4.00000	-0.32054	-4.00000	1.99659	2	0.00000	-4.00000	1
Co(+2a)	6	-4.00000	2.01047	-0.59156	2.01047	3	0.00000	0.00000	-1
Co(+2a)	6	-0.59156	2.01047	6.72984	0.01656	3	-0.27234	6.79063	0
Co(+2a)	6	6.72984	0.01656	6.72984	-0.32099	3	0.00000	6.72984	1
Co(+2a)	6	-4.00000	-0.32099	6.72984	-0.32099	3	0.00000	0.00000	-1
Co(+2a)	6	-4.00000	-0.32099	-4.00000	2.01047	3	0.00000	-4.00000	1
Co(+2a)	6	-4.00000	2.02447	-0.54866	2.02447	4	0.00000	0.00000	-1
Co(+2a)	6	-0.54866	2.02447	6.60251	0.02017	4	-0.28028	6.67447	0
Co(+2a)	6	6.60251	0.02017	6.60251	-0.32141	4	0.00000	6.60251	1
Co(+2a)	6	-4.00000	-0.32141	6.60251	-0.32141	4	0.00000	0.00000	-1
Co(+2a)	6	-4.00000	-0.32141	-4.00000	2.02447	4	0.00000	-4.00000	1

Anexo D.

Cálculos de los porcentajes de cobalto lixiviado

El porcentaje de cobalto lixiviado fue determinado mediante la siguiente ecuación:

$$\%X = \frac{C_{Co}V_{sol}}{m_{Co}} * 100$$

Donde:

$\%X$ =porcentaje de cobalto lixiviado

C_{Co} =concentración de cobalto en el lixiviado

V_{sol} =es el volumen de la solución lixivante

m_{Co} =masa de cobalto en el material catódico 34,55%(p/p) de cobalto

Calculo del porcentaje de eficiencia de lixiviación en función del tiempo

Tiempo	mg Co/L	X	% X
0	0	0	0
5	8716,58	0,238420142	23,8420142
10	9705,88	0,265479958	26,5479958
20	12673,8	0,346659951	34,6659951
30	14652,41	0,400779856	40,0779856
60	19304,81	0,528034567	52,8034567
90	23368,98	0,639199725	63,9199725
120	25347,59	0,693319629	69,3319629
180	31283,42	0,855679343	85,5679343

Calculo de las ecuaciones cineticas en función del tiempo

Tiempo	X	$1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$	$1-(1-X)^{1/3}$	$1-(1-X)^{2/3}$	$1-2X/3-(1-X)^{2/3}$
0	0	0	0	0	0
5	0,23842014	0,021288862	0,08678757	0,16604305	0,007096287
10	0,26547996	0,026788753	0,09773409	0,18591622	0,008929584
20	0,34665995	0,047864515	0,1322797	0,24706147	0,015954838
30	0,40077986	0,066153949	0,15693291	0,28923789	0,022051316
60	0,52803457	0,125369129	0,22141972	0,39381275	0,04178971
90	0,63919972	0,201172658	0,2880946	0,4931907	0,067057553
120	0,69331963	0,249054369	0,32563453	0,54523121	0,083018123
180	0,85567934	0,463223977	0,47546295	0,72486089	0,154407992

Anexo E.

DENSIDAD Y VISCOSIDAD DEL FLUIDO

DENSIDAD DEL FLUIDO



Fuente: laboratorio Unidad de Sales – IDEPROQ

Datos:

$V_{pic} = 10,012 \text{ ml}$

$M_{pic} = 10,702$

$M_{fluido} = 11,885$

Temperatura 70°C	M fluido g	Densidad g/ml
	11,7	
	11,931	
	12,041	
	11,864	
	11,901	
Promedio	11,8874	1,189

VISCOSIDAD

Tabla: constante K y T a temperatura 70°C

Constante del bulbo	Tiempo s
1,237E-07	29,14
1,417E-07	32,23
1,331E-07	27,53
1,281E-07	31,03
1,008E-07	35,74
1,102E-07	26,04
1,229E-07	30,285



μ	$6,69E - 03(Pa * s)$
-------	----------------------

Fuente: laboratorio Unidad de Sales – IDEPROQ

Anexo F.

Determinación del coeficiente de conductividad térmica del acero inoxidable 316L

Tabla A-2 (Continuación)

Metal	Propiedades 20 °C				Conductividad térmica k, W/m. °C									
	ρ , kg/m ³	c_p , kJ/ kg·°C	k , W I m·°C	α , m ² /s × 10 ⁶	-100°C -148 °F	0 °C 32 °F	100 °C 212 °F	200 °C 392 °F	300 °C 572 °F	400 °C 752 °F	600 °C 1112 °F	800 °C 1472 °F	1000 °C 1832 °F	1200 °C 2192 °F
40%	8 169	0.46	10	0.279										
80%	8 618	0.46	35	0.872										
Invar 36% Ni	8 137	0.46	10.7	0.286										
Acero al cromo														
Cr = 0%	7 897	0.452	73	2.026	87	73	67	62	55	48	40	36	35	36
1%	7 865	0.46	61	1.665		62	55	52	47	42	36	33	33	
5%	7 833	0.46	40	1.110		40	38	36	36	33	29	29	29	
20%	7 689	0.46	22	0.635		22	22	22	22	24	24	26	29	
Cr-Ni (cromo níquel): 15% Cr, 10% Ni	7 865	0.46	19	0.527										
18% Cr, 8% Ni (V2A)	7 817	0.46	16.3	0.444		16.3	17	17	19	19	22	27	31	
20% Cr, 15% Ni	7 833	0.46	15.1	0.415										
25% Cr, 20% Ni	7 865	0.46	-12.8	0.361										
Acero de Tungsteno														
w = 0%	7 897	0.452	73	2.026										
1%	7 913	0.448	66	1.858										
5%	8 073	0.435	54	1.525										
10%	8314	0.419	48	1.391										
Cobre:														
Puro	8 954	0.3831	386	11.234	407	386	379	374	369	363	353			
Bronce aluminico														
95% Cu, 5% Al	8 666	0.410	83	2.330										

DAYANA ESTEFANNY DURAN AVENDAÑO

dayana.amb@gmail.com

+591 67057179

SHANTAL SILVANA GARAY MONTOYA

shantal.garay.1@gmail.com

+591 65646758



DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-415/2023
La Paz, 6 de Marzo del 2023

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha 28 de Febrero del 2023, por DAYANA ESTEFANNY DURAN AVENDAÑO con C.I. N° 8330391LP, SHANTAL SILVANA GARAY MONTOYA con C.I. N° 9185756 LP, con número de trámite DA 201/2023, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: "APLICACIÓN DE PROCESO HIDROMETALURGICO PARA SEPARACIÓN DE COBALTO A PARTIR DE BATERÍAS RECICLADAS DE ION LITIO PROCEDENTES DE CELULARES MÓVILES DE LA CIUDAD DE LA PAZ, ESCALA BENCH", cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma descentralizada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos, constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración".

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece "Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios".



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 575,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Illimani.
Tels.: 2192700 - 2192726
191951 Fax: 2192700

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
penalización Gujarrn,
N° 29, Edif. Bicentenario.
Tels.: 3171752 - 72042926

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 737,
entre 16 de Julio y Antezana.
Tels.: 4040403 - 72042927

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2660
Edif. Multifuncion El Gallo
Calle Pío 2, Of. 58,
zona 16 de Julio.
Tels.: 714000 - 72042928

Oficina - Chuquiaguana
Calle Kilometro 1, N° 364
Calle esp. Orinogallina,
zona Parque Bolívar.
Tels.: 72042927

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calle Los Inga y Avenida
Edif. Santa Clara, N° 263.
Tels.: 72042928

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre,
N° 5827, entre Apuruccho
y Surco, Salto Central,
Of. 14 (C/ta Banco Pío).
Tels.: 6229000

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Monsieur Billa y San Alberto,
Edif. 400, Salto N° 262,
Primer Piso, Of. 10.

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley Nº 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*.

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ..."*, por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

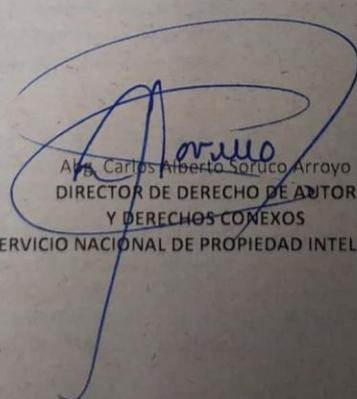
POR TANTO

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"APLICACIÓN DE PROCESO HIDROMETALURGICO PARA SEPARACIÓN DE COBALTO A PARTIR DE BATERÍAS RECICLADAS DE ION LITIO PROCEDENTES DE CELULARES MÓVILES DE LA CIUDAD DE LA PAZ, ESCALA BENCH"**, a favor de las autoras y titulares: **DAYANA ESTEFANNY DURAN AVENDAÑO** con C.I. Nº **8330391 LP**, bajo el seudónimo **DURAN**, **SHANTAL SILVANA GARAY MONTOYA** con C.I. Nº **9185756 LP**, bajo el seudónimo **GARAY**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.



Ab. Carlos Alberto Soruco Arroyo
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS**
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL



CASA/minet
c.c. Arch



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, Nº 505,
entre Esc. Uruguay y
C. Batallón Illimani.
Telf.: 2195700 - 2195276
2195251 Fax: 2195700

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijano,
Nº 29, Edif. Bicentenario.
Telf.: 322752 - 72047936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, Nº 172,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telf.: 6144403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, Nº 2550
Edif. Multicentro El Ceibo
11da. Piso 2, Of. 58,
zona 16 de Julio.
Telf.: 7240001 - 72043079

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, Nº 368
casi esp. Urutagaitza,
zona Parque Bolívar.
Telf.: 72009573

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calle Cero Trece y Avenida
Edif. Santa Clara, Nº 261.
Telf.: 72095286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre,
Nº 5837, entre Apacacho
y Junta, Galería Central,
Of. 14 (Ex Banco Fie).
Telf.: 6720088

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alva y San Alberto,
Edif. AM. Salfinas Nº 262,
Primer Piso, Of. 11.

www.senapi.gob.bo